

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství**



Bakalářská práce

**Mikrostrukturní charakteristiky a vady odlévaných Al-Si slitin**

**Microstructure features and defects of cast Al-Si alloys**

Jméno a příjmení: Opatrná Zdeňka, OPA 0013

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Monika Losertová

## Zadání bakalářské práce

Student: **Zdeňka Opatrná**  
Studijní program: **B3923 Materiálové inženýrství**  
Studijní obor: **3911R036 Progresivní technické materiály**  
Téma: **Mikrostrukturní charakteristiky a vady odlévaných Al-Si slitin**  
**Microstructure features and defects of cast Al-Si alloys**  
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Rešerše k problematice vady a mikrostruktura Al-Si slitin po nízkotlakém odlévání, vliv vsázky a technologických parametrů
3. Experimentální studium a hodnocení mikrostruktury Al-Si vzorků
4. Diskuze a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Handbook of Aluminium. Volume 1. Physical Metallurgy and Processes. Ed. by Toten, E.G., Mc Kenzie, D.S. New York, 2003, 1296 p.
- [2] Handbook of Aluminium. Volume 2. Alloy Production and Materials Manufacturing. Ed. by Toten, E.G., Mc Kenzie, D.S. New York, 2003, 724 p.
- [3] Michna Š., a kol. Encyklopedie hliníku. Adin s.r.o., Prešov, 2005, 700s.
- [4] Zolotarevsky, V.S., Belov, N.A., Glazoff, M.V. Casting Aluminum Alloys. Elsevier Ltd., 2007, 530 p.
- [5] Odborné publikace v časopisech Progress in Material Science, Materials Science and Engineering, Science and Technology of Advanced Materials, Materials Science Forum aj.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Monika Losertová**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

  
prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# Zásady pro vypracování bakalářské práce

## I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

### Uspořádání bakalářské práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah BP                  |
| 2. Originál zadání BP                        | 7. Textová část BP           |
| 3. Zásady pro vypracování BP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

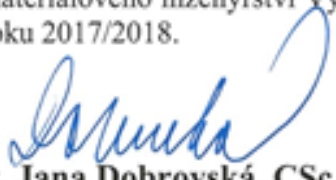
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava



# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 10.5.2018

Opal Zeduka  
.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Poděkování**

Tímto bych chtěla poděkovat paní doc. Dr. Ing. Monice Losertové za vedení bakalářské práce, za cenné informace a užitečné připomínky, které mi poskytla. Taktéž bych chtěla poděkovat své rodině za čas, trpělivost, podmínky a hlavně motivaci, které mi poskytli při psaní této práce.

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na popis slitin hliníku, mikrostrukturu a jejich vady. V praktické části práce byly charakterizovány různé typy pórovitosti materiálů. Vzorky byly odebrány ze slitiny 3xx (Al-7Si-0.3Mg) a zkoumány pomocí optické mikroskopie a počítačového softwaru Image-Pro plus od firmy Media Cybernetics.

## **Klíčová slova**

Vady Al-Si slitin, Al-Si, pórovitost, mikrostruktura

## **Abstract**

This thesis is focused on description of aluminium alloys, microstructure and their defects. Various types of material porosity were characterized in practical part of thesis. The samples were taken from alloy 3xx (Al-7Si-0.3Mg) and analyzed by optical microscopy and Image-Pro plus software made by Media Cybernetics.

## **Keywords**

Al-Si defects in alloys, Al-Si, porosity, microstructure,

# OBSAH

ÚVOD.....	8
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	9
1.1 Rozdělení a charakteristika Al slitin .....	9
1.1.1 Tvařitelné slitiny .....	10
1.1.2 Slévárenské slitiny .....	16
1.2 Slitiny Al-Si .....	18
1.2.1 Rozdělení podle obsahu Si .....	18
1.2.2 Technologie výroby .....	19
1.2.3 Tepelné zpracování .....	20
1.3 Použití Al-Si slitin .....	24
2 VLASTNOSTI A VADY MIKROSTRUKTURY AL-SI SLITIN .....	26
2.1 Charakteristiky mikrostruktury .....	26
2.1.1 Velikost a tvar zrna .....	26
2.1.2 Vzdálenost dendritických ramen .....	27
2.1.3 Zjemnění zrna .....	27
2.2 Vady v odlitcích Al-Si slitin .....	28
2.2.1 Staženiny a řediny .....	28
2.2.2 Trhliny .....	28
2.2.3 Pórovitost a mikrostaženiny .....	29
2.2.4 Vměstky .....	30
3 PRAKTICKÁ ČÁST .....	33
3.1 Výskyt licích vad Al-Si slitin .....	33
3.2 Mechanizmy vzniku pórovitosti .....	34
3.3 Vzorčky z odlitku .....	37
ZÁVĚR .....	41
LITERATURA .....	42
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....	44



## ÚVOD

Čistý hliník v současné době, díky svým vlastnostem není ve výrobě často používán. Kombinací hliníku a jiných prvků vznikají slitiny, které mají pro výrobu zajímavé a žádoucí vlastnosti. Pro zlepšení mechanických a slévárenských vlastností se využívá nejvíce v kombinaci s dalšími prvky. Vznikají tak slitiny typu Al-Si, Al-Mg, Al-Cu, Al-Si-Mg, Al-Si-Cu. V slévárenském průmyslu jsou nejčastěji používány siluminy. Jsou nejpoužívanější slitiny určené pro odlévání.

Problematika výroby odlitků je velmi rozsáhlým předmětem a se zdokonalováním výrobních metod se stále víc a víc rozrůstá literatura, která se touto problematikou zabývá.

Vady odlitků jsou, jako u každého jiného výrobku, nejen z ekonomických, ale i řady dalších důvodů, nežádoucím projevem výrobního procesu.

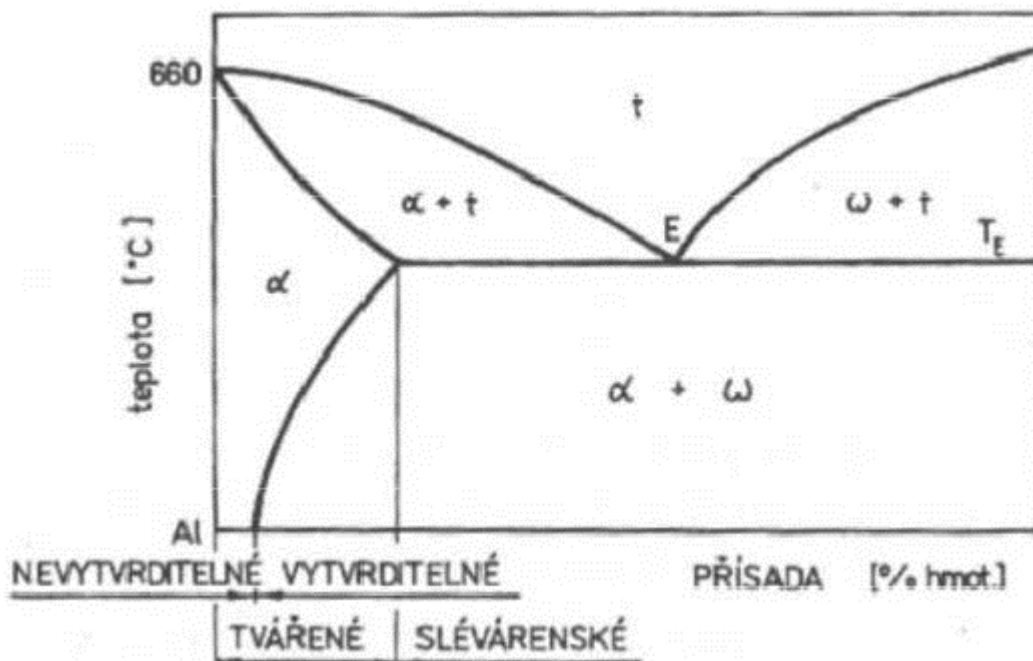
Ke zlepšení mechanických vlastností se tyto slitiny často legují s jinými prvky. Převážně je to Cu, Mg a Ni. Další možnost zlepšení vlastností siluminů je očkování (Ti, B, TiB) nebo modifikací (Sr, Na). Použití hliníkových slitin neustále roste. Právě modifikace slitin hliníku má v současné době velký význam, protože zlepšuje jejich vlastnosti.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Rozdělení a charakteristika Al slitin

Slitiny hliníku patří kromě ocelí k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům. Surovinou pro výrobu hliníku je minerál bauxit, v čistém stavu oxid hlinitý. Z tohoto oxidu z taveniny ve směsi s kryolitem se elektrolyticky získává kovový hliník. Výroba hliníku byla patentována v roce 1886. Od roku 1890 byla pak zahájena v průmyslovém měřítku. První slitina hliníku byla vyvinuta v roce 1906. Tuto slitinu známe jako dural ( $\text{AlCu4Mg}$ ). Tato slitina znamenala převrat ve stavbě letadel a vzducholodí. Dnešní základní řada nejvíce používaných slitin hliníku je celosvětově unifikována a její vývoj je v podstatě ukončen.

Hliníkové slitiny se dělí podle schopnosti zvyšovat úroveň mechanických vlastností dalším zpracováním po odlití na *slitiny tvařitelné* a *slitiny slévarenské*. Podle schopnosti zlepšit mechanické vlastnosti (zvýšit tvrdost a pevnost) po tepelném zpracování je možné slitiny hliníku rozdělit na *nevytvrditelné* nebo *vytvrditelné*. Toto základní rozdělení slitin hliníku je uvedeno v obecném rovnovážném diagramu na Obr. 1) [1, 2].



Obrázek 1: Dělení slitin hliníku podle zpracování [3]

## **Nevytvrditelné slitiny**

Nevytvrditelné slitiny nemůžeme vytvrzovat tepelným zpracováním [3]. Jejich pevnost je způsobena substitučním zpevněním tuhého roztoku. Pevnostní charakteristiku u těchto slitin zvýšíme tvářením za studena, kdy dochází k deformaci krystalové mřížky a vzniku napětí v mřížce vedoucí pohybu dislokací (deformačnímu zpevnění). Nejvýznamnějšími představiteli těchto slitin jsou Al-Mn a Al-Mg.

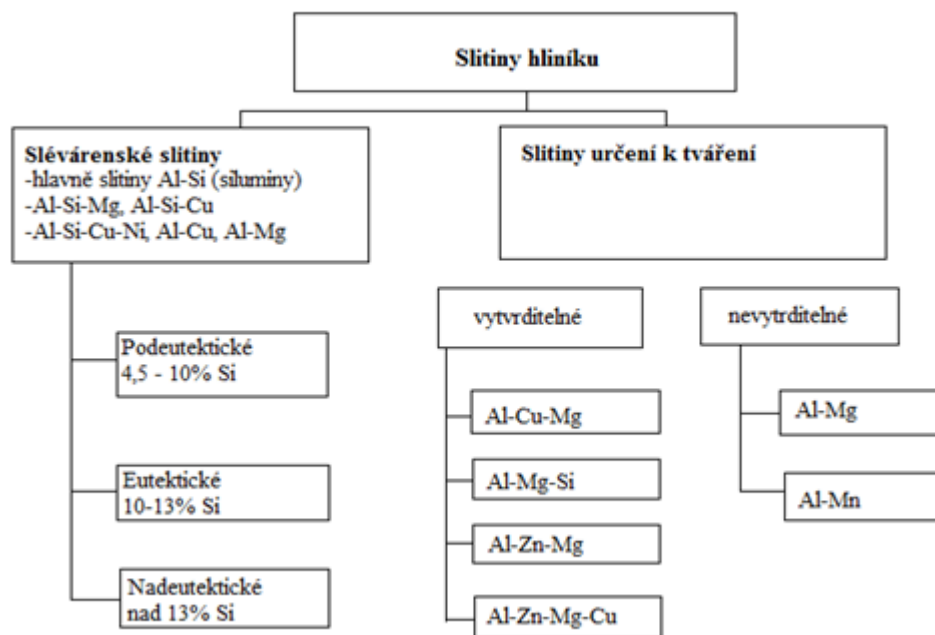
## **Vytvrditelné slitiny**

Zpevnění slitin velmi výrazně ovlivňuje přítomnost Mg a Cu. Pro vytvrditelnost slitiny je třeba, aby obsahovala příznivou koncentraci přísad, tedy aby měly přísady velkou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku v závislosti na teplotě, potom je možné přechlazením vytvořit přesycený tuhý roztok. Po uskutečnění tepelného zpracování u těchto slitin dojde k poklesu plasticity a zároveň ke zvýšení pevnostních charakteristik.

Nejvýznamnějšími slitinami hliníku ke tvářením, které se vytvrzují a výrazně zvyšují své mechanické vlastnosti, jsou slitiny Al-Cu, Al-Cu-Si, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg-Cu, Al-Zn-Mg [1,3].

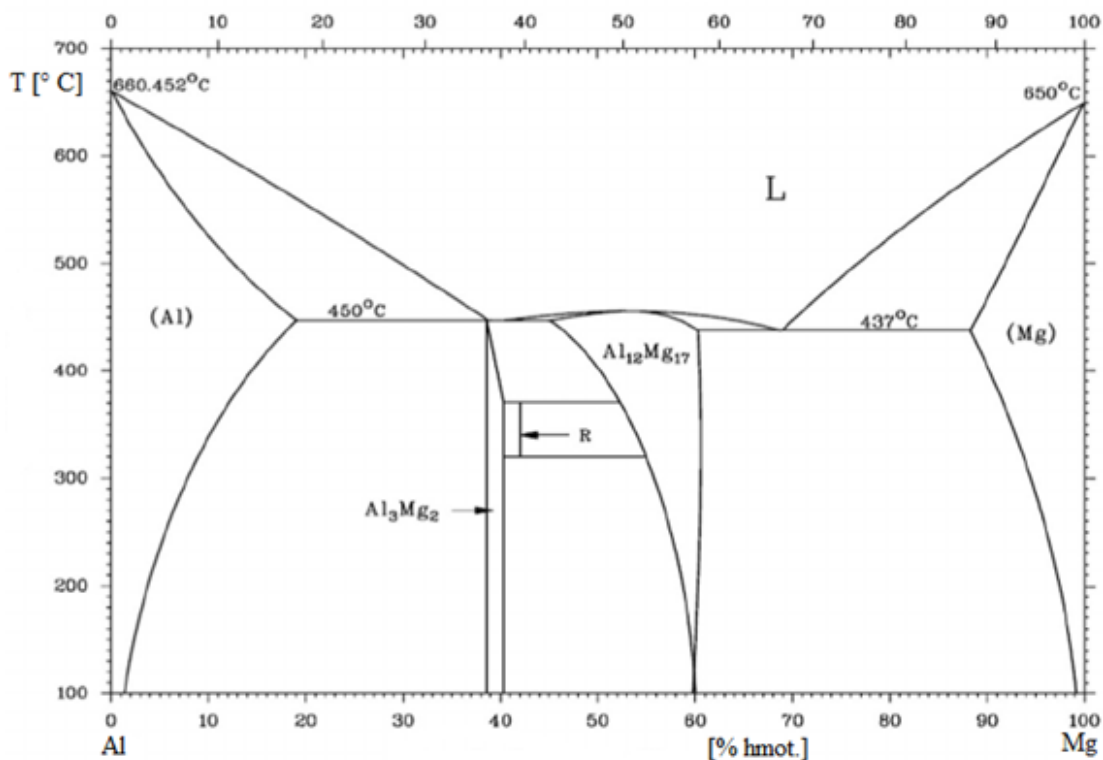
### **1.1.1 Tvařitelné slitiny**

Slitiny hliníku pro tvářením můžeme rozdělit do dvou dalších větších podskupin, jak je znázorněno na Obr. 2. Tyto slitiny mají rozdílné vlastnosti. Charakteristické pro nízkopevnostní slitiny, jako např. typu Al-Mn a Al-Mg, je dobrá odolnost proti atmosférické korozi z důvodu nepřítomnosti mědi. Nevýhodou těchto slitin je ale nemožnost dále je tepelně zpracovávat (vytvrzovat) za účelem zpevnění. Výhodou je dobrá lomová houževnatost, tvařitelnost a svařitelnost [1].



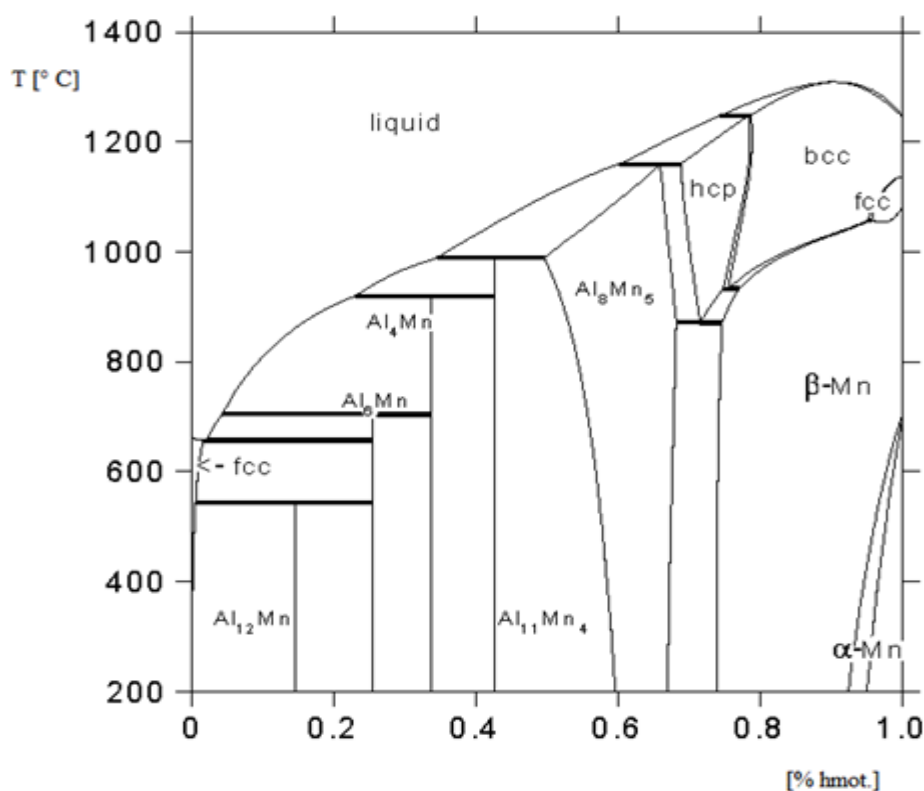
Obrázek 2: Dělení slitin Al podle legujících příměsí [4]

**Slitiny Al-Mg**, které obsahují hořčík nad 6 %, mají sklon k interkrystalické korozi. K tomu dochází obzvláště při mechanickém zatěžování. Právě z tohoto důvodu nejsou tak často používány. Jejich pevnost můžeme za určitých podmínek zvýšit ze stávajícího žíhaného stavu ze 100-170 MPa až na 420 MPa. Na Obr. 3 je uveden rovnovážný fázový diagram Al-Mg s výskytem tuhého hořčíku v hliníku a intermetalickými fázemi  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ , R a  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ .



Obrázek 3: Fázový diagram binárního systému Al-Mg [5]

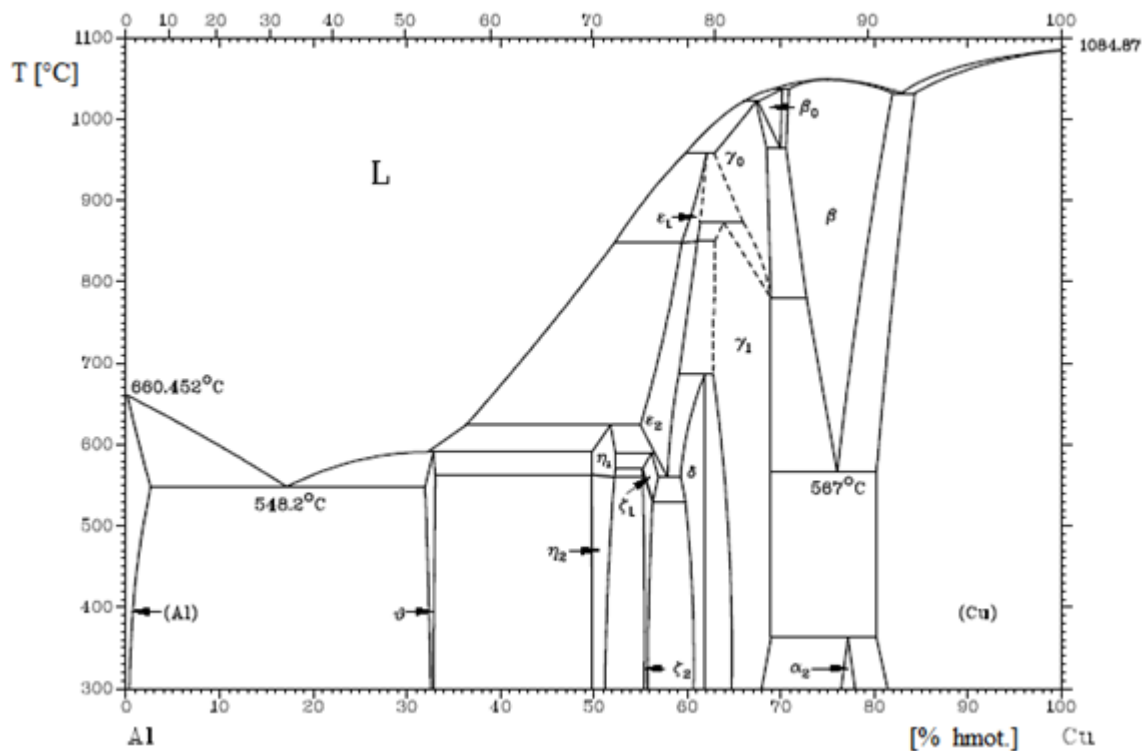
**Slitiny Al-Mn** se zásadně tepelně nevytvrzují. Důvodem je nevelké zvýšení pevnosti v konečném stavu. Slitiny Al-Mn mají podobné vlastnosti jako slitiny Al-Mg, například u slitiny AlMn1 v měkkém stavu je pevnost 130 MPa. Rovnovážný fázový diagram Al-Mg je znázorněn na Obr. 4. V binárních sloučeninách mírně snižujeme teplotu tání hliníku. Nejvyšší rozpustnosti v tuhém roztoku 1,8 hm.%. Intermetalická fáze má složení  $\text{Al}_6\text{Mn}$ . Ta vzniká při vysoké koncentraci v tavenině peritektickou reakcí z  $\text{Al}_4\text{Mn}$  a taveniny. Dál se může vytvářet metastabilní fáze  $\text{Al}_{12}\text{Mn}$ , jejichž přítomnost je možno potlačit přidavkem křemíku a železa.



Obrázek 4: Fázový diagram binárního systému Al-Mn [6]

Další tvařitelnou skupinou jsou slitiny Al-Cu s vyšší pevností a nízkou odolností proti korozi na bázi Al-Cu, jako např. Al-Cu-Ni nebo Al-Cu-Mg. **Slitiny Al-Cu**, Al-Cu-Mg, jež nazýváme duraly a superduraly, mají cca 1-6 % Cu a do 2 % Mg. Duraly mají v precipitačně vytvrzeném stavu velmi dobré mechanické vlastnosti, jejich pevnost  $R_m$  dosahuje až 530 MPa.

Nevýhodou těchto slitin je ale špatná odolnost proti korozi oproti čistému hliníku. Duralové plechy se proto plátují čistým hliníkem, aby došlo ke zvýšení korozní odolnosti. Na Obr.5 je znázorněn fázový diagram Al-Cu. Maximální rozpustnost mědi v tuhém roztoku hliníku je za rovnovážných podmínek 2,48 at.% (~ 5,7 hm.%) Cu při eutektické reakce 548.2 °C [6].



Obrázek 5: Fázový diagram binárního systému Al-Cu [7]

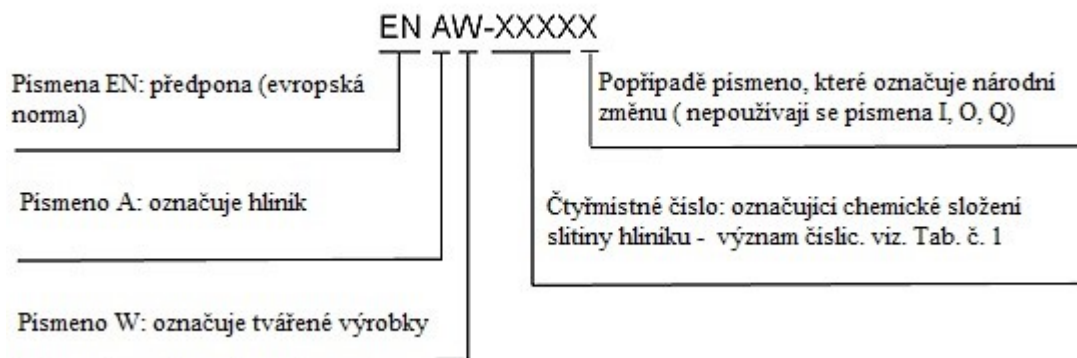
Tvářené slitiny hliníku nalézají v praxi široké uplatnění jako konstrukční materiály ve stavebním, leteckém, automobilovém, ale i počítačovém průmyslu. Vzhledem ke snaze co nejvíce snížit váhu výrobků při zachování dostatečné pevnosti v současné době tvářené slitiny hliníku, především ty vytvrditelné, nabízejí vhodnou alternativu ke konstrukčním ocelím [4].

Tvářené výrobky a ingoty mají své značení dle normy ČSN EN 573-1 až 3. Označuje se písmeny EN AW (kde A znamená hliník, W tvářené výrobky) a dalšími čtyřmi číslicemi, tak jak je uvedeno v Tab.1. [6].

Značení hliníku a jeho slitiny pro tváření (tvářené výrobky a ingoty určené ke tváření) dle ČSN EN 573-1 až 3 je znázorněno a uvedeno na Obr.6.

Tab. 1 jsou uvedeny hlavní legující přísady slitin se značením podle norem EN 573-1





Obrázek 6: Struktura značení hliníku dle ČSN EN 573 [6]

Tabulka 1: Označování slitin hliníku na tváření podle EN 573-1 [6]

Hlavní legující prvek	Označení série
Hliník čistoty minimálně 99,00 %	1000
Měď	2000
Mangan	3000
Křemík	4000
Hořčík	5000
Hořčík a křemík	6000
Zinek	7000
Jiné prvky (prvky Fe, Li, Sc)	8000
Nepoužívaná skupina	9000

V následujících odstavcích je uveden podrobnější rozbor jednotlivých tříd slitin určených ke tváření:

**1xxx**-hliník technické čistoty-čistota slitiny je nad 99 % hliníku. Poslední dvě číslice v označení udávají právě čistotu nad 99 %, například 1060 znamená 99,6 % hliníku. Pevnost v tahu se pohybuje v rozmezí 70-130 MPa. Používá se zejména v elektrotechnice, v chemickém průmyslu a pro výrobu obalů.

**2xxx**-hlavní legujícím kovem je měď, která způsobuje vysokou pevnost v tahu, ale negativně působí na korozní odolnost. Slitiny této řady byly prvními slitinami hliníku vůbec, známé jsou také jako duraly. Nevýhodou těchto slitin je horší svařitelnost.

**3xxx**-přísadovým prvkem v této řadě je mangan. Ten zvyšuje mechanické vlastnosti oproti čistému hliníku asi o 20 %. Korozní odolnost a tvařitelnost je dobrá. Používají se hlavně ve stavebnictví ve formě plechů.

**4xxx**-křemík snižuje teplotu tání, toho se využívá pro svařování a pájení. Hlavní využití této řady spočívá ve výrobě svařovacích drátů a pájek.

**5xxx**-slitiny Al-Mg. Hořčík zvyšuje pevnost v tahu a korozní odolnost je výborná. Hlavní využití nacházejí slitiny této řady ve stavbě lodí a jako svařovací dráty.

**6xxx**-legujícími prvky jsou křemík a hořčík v poměru vycházejícím z obsahu jednotlivých prvků v křemičitanu hořečnatém ( $Mg_2Si$ ). Tyto slitiny představují nejvyváženější poměr mezi korozní odolností a pevností. Mez kluzu je porovnatelná s nízkouhlikovou ocelí. Slitiny 6xxx jsou momentálně nepoužívanější slitiny, jejich oblíbenost je způsobena snadnou tvařitelností za studena. Protlačováním lze vyrábět tvarově velmi složité profily.

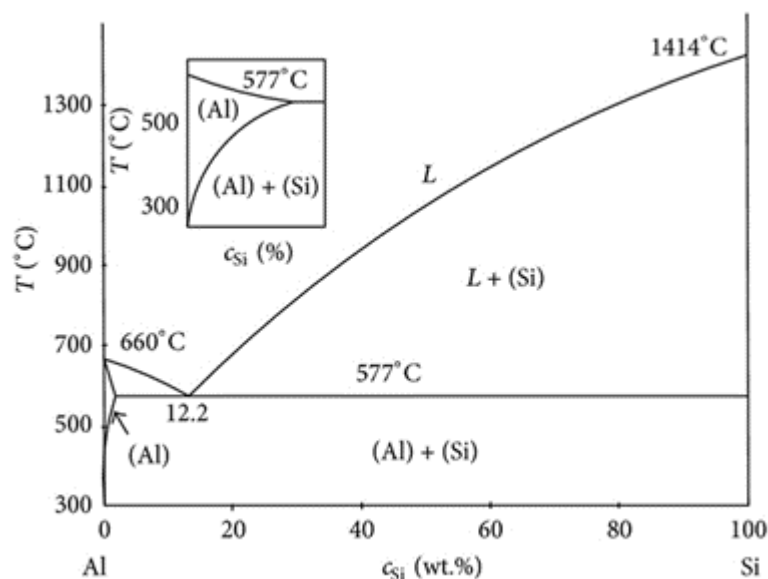
**7xxx**-primární legurou je zinek. Tato řada se dále dělí na dvě podskupiny, hliník-zinek-hořčík a hliník-zinek-hořčík-měď. Slitiny této řady patří k jedněm z nejpevnějších, pevnost v tahu běžně přesahuje 500 MPa. Používají se na rámy letadel nebo jízdních kol, v automobilovém průmyslu. Korozní odolnost je u těchto slitin dobrá, pokud obsahují měď, je horší, ale stále dostačující.

**8xxx**-slitiny legovány jinými prvky než výše uvedenými, například lithiem nebo skandiem [8].

### 1.1.2 Slévárenské slitiny

Slévateľnost slitiny je ovlivněna řadou vlastností (tepelná vodivost, teplota tavení, viskozita, zabíhavost, způsob tuhnutí atd.). Zjednodušeně je možno říci, že dobře slévateľné jsou takové slitiny, které mají co nejmenší interval teplot tuhnutí, nejlépe pak ty s jedinou teplotou tuhnutí, tedy eutektické slitiny. Pro dosažení této podmínky musí slévárenské slitiny hliníku obsahovat větší množství legujících prvků než ty určené pro tváření. Nejdůležitějšími slitinami pro slévářství jsou slitiny Al-Si (siluminy) [3,9].

Rovnovážný binární diagram Al-Si (Obr.7). Al-Si je jednoduchý eutektický systém se dvěma tuhými roztoky, diamantovým kubickým (Si) a KPC (Al). Nejvyšší rozpustnost křemíku v hliníku činí  $1.5 \pm 0.1$  at. % při eutektické teplotě  $577^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ . Rozpustnost se snižuje s klesající teplotou. Za normální teploty jsou krystaly označené  $\alpha$  tvořeny prakticky čistým hliníkem. Druhou fází ve struktuře těchto slitin jsou krystaly prakticky čistého křemíku. [6]



Obrázek 7: Fázový diagram binárního systému Al-Si [10]

Slitiny hliníku na odlitky označujeme podle ČSN EN 1706. Dle příslušné normy se označení materiálu skládá z písmen EN (označující evropskou normu), kterou v souladu s doporučením vydaným 15.12.1970 vydala společnost The Association Inc. V USA. Původní charakteristická písmena AA před číslem slitiny, jsou americké značky. Po sjednocení norem evropských a českých může být označení slitin hliníku dvojím způsobem, a to dle normy číselně nebo chemického značení a dalších šesti znaků [1].

V Tab. 2 jsou vypsány řady hliníkových slitin pro odlitky a jejich značení podle normy ČSN EN 573-3 a podle ČSN.

Tabulka 2: Řady slitin hliníku a značení [11]

řada	slitiny	označení			
		Dle ČSN EN 573-3		Dle ČSN	
		Číselné	podle chem.složení	číselné	podle chem.složení
20000	Al-Cu	AC-21000	AC-AlCu4MgTi	-	-
	Al-Si	AC-42100	AC-AlSi7Mg0,3	424334	AlSi7Mg
40000		AC-43000	AC-AlSi10Mg	424331	AlSi10MgMn
		AC-44100	AC-AlSi12	424330	AlSi12Mn
50000	Al-Mg	AC-51200	AC-AlMg9	424519	AlMg10SiCa
		AC-51300	AC-AlMg5	-	-

70000	Al-Zn	AC-71000	AC-AlZn5Mg	-	-
-------	-------	----------	------------	---	---

## 1.2 Slitiny Al-Si

### 1.2.1 Rozdělení podle obsahu Si

Vlastnosti a struktura siluminu jsou především závislé na obsahu Si. Jejich společným znakem je vysoký obsah přísad. Binární diagram Al-Si můžeme vidět na Obr. 7. Podle obsahu Si můžeme tyto slitiny rozdělit na: *podeutektické* (4,5 až 10 %), *eutektické* (10 až 13 %), *nadeutektické* (14-17 výjimečně až 25 %) [12,13,14].

**Eutektické siluminy** mají čistě eutektickou strukturu (Obr. 8.b) a jejich největší předností je vynikající zabíhavost, která umožňuje výrobu tenkostěnných a tvarově složitých odlitků. Eutektická reakce probíhá při teplotě  $577 \pm 1$  °C a složení  $12,2 \pm 0,1$  at.% Si. Tyto siluminy jsou vhodné jak pro lití do kovových forem, tak pro tlakové lití nebo lití do vytavitelného modelu. Maximální rozpustnost v hliníku je  $1,5 \pm 0,1$  at.% při eutektické teplotě a s klesající teplotou se snižuje na 1,25 at.% (1,3 hm%) Si při 550 °C a 0,05 at.% Si při 300 °C a dále s poklesem se teploty již mění nepatrně. Eutektické siluminy mají nejlepší slévárenské vlastnosti a v současné době mají velké využití v automobilovém a leteckém průmyslu.



Obrázek 8: Charakteristické struktury slitin [15] a) podeutektické 8 at. % Si; b) eutektická 12 at. % Si; c) nadeutektická 20 at. % Si

**Nadeutektické siluminy** ve své struktuře obsahují eutektikum a hrubé krystaly křemíku (Obr.8.c). Tyto jehlicové hrubé krystaly vznikají v důsledku větší krystalizační schopnosti křemíku oproti hliníku (Si začíná krystalizovat za menšího přechlazení taveniny). Krystaly Si způsobují křehkost a siluminy je tedy nutné modifikovat. Mezi hlavní přednosti nadeutektických siluminů patří velmi nízký koeficient tepelné roztažnosti a abrazivzdornost. Tyto výhody se uplatňují například při použití na odlitky pístů spalovacích motorů [6,12].

**Podeutektické siluminy** ve své struktuře obsahují dendrity tuhého roztoku  $\alpha(\text{Al})$  a eutektikum, které je vyloučeno v mezidendritických prostorech (Obr.8.a). Podeutektické siluminy mají poněkud nižší zabíhavost než eutektické, i přesto jsou jejich slévárenské vlastnosti dostatečně dobré.

### 1.2.2 Technologie výroby

Výhodou slévárenských slitin je dobrá slévatelnost, nízká teplota tavení, odolnost vůči korozi, krátký interval krystalizace [6].

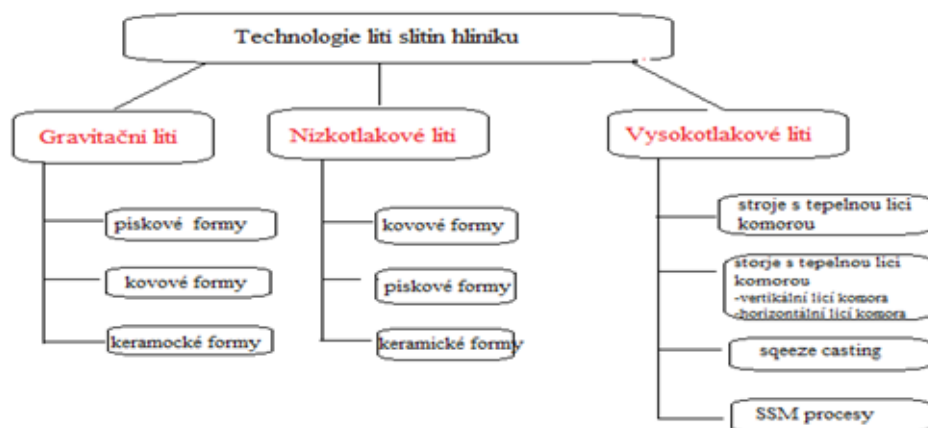
Pokud je výskyt intermetalických fází rozsáhlý, zhoršuje se tvařitelnost těchto slitin. Mechanické vlastnosti závisí na způsobu lití, a to buď do pískových forem, kde vzniká hrubá struktura, nejnižší pevnostní charakteristiky nebo do kovových forem kde vzniká jemná struktura.

Slitiny Al-Si jsou nejvýznamnější, málo se smršťují. To je způsobeno vlivem velkého množství přísad (Mn, Mg, Cu, Ni). Jsou dobře tekuté, velmi odolné proti korozi.

Mechanické vlastnosti zlepšujeme očkovaním (Na). Tyto slitiny se používají pro tenkostěnné, složité odlitky.

Výslednou technologii vybíráme podle konstrukce odlitku, slitiny, požadavky na jiné vlastnosti odlitku nebo počtu kusů ve výrobě. Dnešní technologie pro lití hliníkových slitin využívají metody *gravitačního, nízkotlakého a vysokotlakého lití* [2].

V automobilovém průmyslu se velice často využívají metody tlakového lití, největší zastoupení mají nízkotlaké a vysokotlaké lití. Rozdělení můžeme vidět na Obr. 9.



Obrázek 9: Technologie lití slitin Al [16]

**Gravitační lití** se provádí do kovových forem. Na rozdíl od lití do pískových forem je tato metoda dražší, ale výsledné odlitky mají lepší mechanické vlastnosti, dobré rozměrové hodnoty a hladší povrch. Tuto metodu nelze použít pro tenkostěnné odlitky. Maximální hmotnost odlitku je omezena na 15 kg.

**Nízkotlaké lití** se používá pro odlitky z lehkých neželezných kovů. Při nízkotlakém lití může být při plnění ovlivněna rychlost proudění, maximální tlak závisí na hustotě odlévaného kovu. Nejčastěji je tloušťka stěny od 8 do 30 mm. Výhodou nízkotlakého lití je vysoká kvalita odlitků. Průběhem pracovního cyklu se odlévaný kov nedostane do styku s okolní atmosférou. Při plnění je proudění taveniny klidné. Odlitek musí usměrněně tuhnout odshora směrem dolů, což způsobuje dobrou kompaktnost odlitků bez vnitřních vad jako jsou plynové bubliny či vměstky.

**Vysokotlaké lití** se využívá zejména na výrobu bloků motorů, převodových skříní apod. Pomocí gravitačního lití se vyrábějí pístní kroužky, avšak má menší zastoupení než ostatní metody odlévání.

Odlitky mají podstatně nižší mechanické vlastnosti proti výrobkům tvářeným. Mez pevnosti dosahuje maximálně do 250MPa. Velice často jsou používány slitiny Al-Si – siluminy [6].

### 1.2.3 Tepelné zpracování

Tepelným zpracováním slitiny hliníku můžeme rozdělit na několik způsobů zpracování, které se provádějí pro zvýšení mechanických vlastností (vytvrzování) nebo také pro dosažení

měkkého stavu či některých jiných vlastností materiálu [6]. Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin můžeme rozdělit do tří základních skupin:

- a) rozpouštěcího žíhání
- b) rychlého ochlazení
- c) vytvrzování (stárnutí)

### **Rozpouštěcí žíhání**

Rozumíme tím ohřev a dostatečnou výdrž na takové teplotě, při které dojde k maximálnímu převedení přísady do tuhého roztoku hliníku. Při volbě teploty rozpouštěcího žíhání se vychází z fázového diagramu slitiny a z přesnosti úpravy teploty v peci. Při homogenizačním ohřevu nesmí dojít k překročení teploty solidu, aby nedošlo k natavení hranic zrn slitiny. V takovém případě dochází k degradaci mechanických vlastností materiálu.

### **Rychlé ochlazení**

Nejčastěji se provádí do vody. Vznik přesyceného tuhého roztoku při teplotě okolí je cílem, u kterého je obsah rozpuštěné příměsi vyšší, než odpovídá její rovnovážné rozpustnosti při dané teplotě. Veškerá zacházení se slitinou se musí provádět co nejrychleji. Nedochozí tak k částečnému rozpadu tuhého roztoku hliníku. Méně razantní ochlazování média se používá u masivnějších součástí, kde hrozí nebezpečí deformací.

### **Vytvrzování (stárnutí)**

Přesycený tuhý roztok je termodynamicky nestabilní, dochází k jeho rozpadu. U některých slitin dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku již při teplotě okolí, pochod označujeme jako přirozené stárnutí. Ohřevem se proces urychlí při umělém stárnutí. Rozpad přesyceného tuhého roztoku je obecně difúzní proces, který začíná nukleací a vznikem koherentních precipitátů tzv. Guinierových-Prestonových zón, které způsobí pnutí v mřížce v okolí zón. To je překážkou pro pohyb dislokací, s čímž je spojený vytvrzovací efekt. Tyto zóny postupně rostou a ztrácejí koherenci. Proces končí vznikem nekoherentního rovnovážného precipitátu. Vznik rovnovážného precipitátu je spojen s poklesem tvrdosti. Při delší výdrži na teplotě stárnutí dochází k nežádoucímu hrubnutí rovnovážného precipitátu a klesá tvrdost. Toto stádium označujeme jako přestárnutí [16].

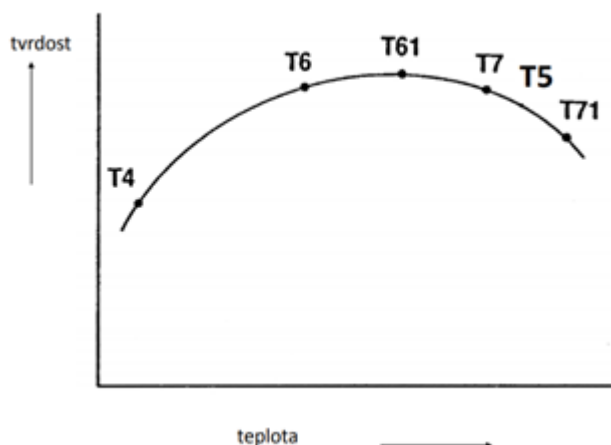


## Tepelné zpracování pro Al-Si

Odlitky slitin hliníku Al-Si se ve většině případů nezpracovávají. Tepelné zpracování se nejčastěji používá u pískových a kokilových odlitků. Tlakové odlitky jsou v litém stavu. Dále se pak používá pro ovlivnění způsobu rozložení prvků ve struktuře, zlepšení obrobiteľnosti, změně jiných technologických vlastností nebo odolnosti proti korozi.

Tabulka 3: Tepelné zpracování versus dosažené mechanické hodnoty [17]

	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Mez kluzu $R_p$ [Mpa]
T4	min 120	min 60
T64	min 180	min 120
T66	min 215	min 160



Obrázek 10: Graf závislosti tvrdosti jednotlivých materiálů na teplotě [17]

## Stavy tepelného zpracování slitin Al-Si

- F litý stav;
- 0 žíhání na odstranění vnitřního pnutí nebo stabilizační žíhání;
- T4 rozpouštěcí žíhání + vytvrzení za studena;
- T5 umělé stárnutí bez homogenizačního žíhání, stabilizace tvaru a rozměrů (zlepšení obrobiteľnosti, odstranění vnitřního pnutí) 205 °C-260 °C / 7-10 hod.;
- T6 komplexní tepelné zpracování, rozpouštěcí žíhání (520 °C-540 °C / 3-6 hod), rychlé ochlazení, precipitační vytvrzování za tepla (145 °C-160 °C / 3-5 hod);

- T7 s přestárnutím;
- T61 na maximální pevnost a tvrdost;
- T64 na maximální houževnatost;
- T66 na specifickou pevnost, tvrdost a houževnatost;
- T71 Přestárnutí do stabilizovaného stavu [18].

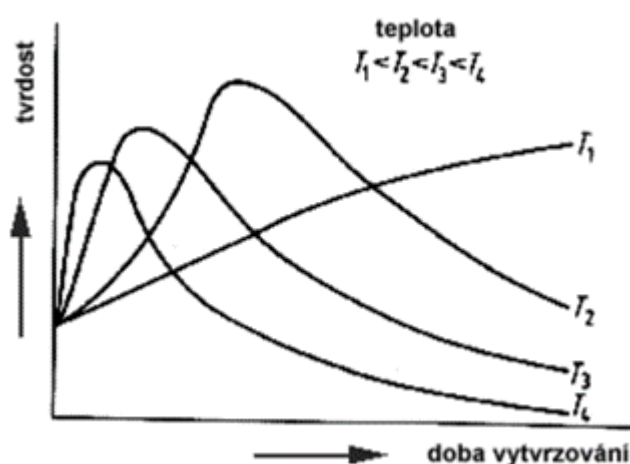
## Vytvrzování

Tvrdost slitin Al-Si se po odlití pohybuje v intervalu 60-80 HB. To odpovídá 21-40 HRB. Tvrdost se zvyšuje vytvrzováním, dosahuje pak i více 100 HB (55 HRB).

Podmínkami pro vytvrzování je přítomnost přísady (Cu, Mg, Ni, Zn) → fáze  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{MgZn}_2$ , dále pak na obsahu přísady (dle křivky solvu) a rozpustnosti přísad. Výchozí polotovár je odlitek, který ve formě ztuhl běžným způsobem. Cílem je zpětné rozpuštění intermetalických fází do homogenního roztoku  $\alpha\text{-Al}$  a jejich následné vyloučení v podobě koherentních nebo semi-koherentních útvarů, které způsobují zpevnění slitiny [14].

## Vytvrzování za tepla

Tímto způsobem vytvrzujeme slitiny Al-Si-Mg a Al-Mg. Podle druhu slitiny volíme teplotu vytvrzování, většinou mezi 140-180 °C. Doba vytvrzování pak bývá okolo 3 až 8 hod. Při příliš vysokých teplotách se získávají horší mechanické vlastnosti než při teplotách optimálních.



Obrázek 11: Vliv teploty na stárnutí [19]

Vlastnosti slitiny po ukončení vytvrzování jsou závislé také na obsahu vytvrzovacího prvku. U běžných vytvrditelných slitin bývá obsah hořčíku Al-Si-Mg okolo 0,3 – 0,45 % Mg,

u vysoko pevných slitin je to až 0,7 %. Čím více je zde hořčíku, tím mají lepší pevnost a tvrdost, ale tažnost bude klesat. Účelem vytvrzování je zvýšení tvrdosti, meze kluzu, meze pevnosti. Dále pak snížení tažnosti.

### Vytvrzování za studena

Za studena vytvrzujeme slitiny AlSiCu s vysokým obsahem mědi. Proces stárnutí probíhá pomalu, samovolně a finálních vlastností výrobek dosáhne za více než 100-150 hod [19].

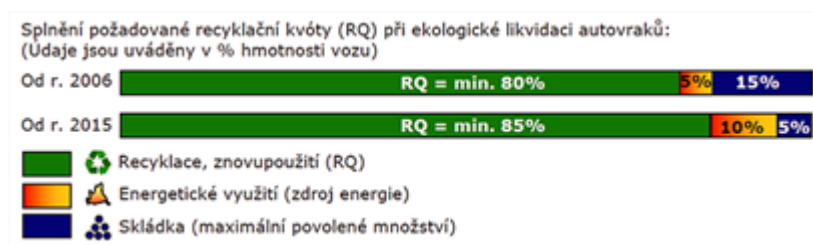
## 1.3 Použití Al-Si slitin

Existuje obrovské množství slévárenských slitin hliníku. Každá oblast, ve které se tyto materiály používají, má specifické požadavky na jejich vlastnosti. Hojně používaný je ve formě slitin v dopravě, kterou můžeme rozdělit na několik oblastí a to

- automobilový průmysl;
- letecký průmysl;
- kolejová doprava;
- konstrukce lodí;
- kosmonautika.

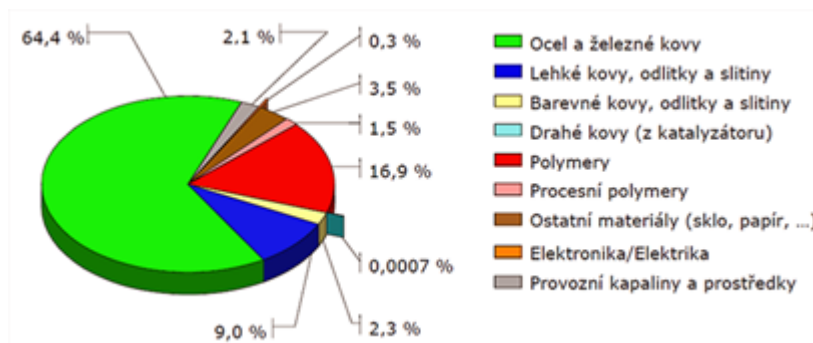
Právě v automobilovém průmyslu mají slitiny hliníkových odlitků největší uplatnění. Hlavním důvodem pro použití, a to nejen v automobilovém průmyslu, je nízká hmotnost, jež se výrazně odráží ve zlepšení využití paliva a snížení celkových škodlivých emisí produkovaných automobilovou dopravou.

Použitím hliníkových materiálů v automobilovém průmyslu není pouze hmotnost, ale také výborná korozivzdornost, vyšší životnost, dobrá kombinace s jinými materiály, výborná deformační schopnost, lehká konečná separace odpadů, která je znázorněna na Obr. 12 [20].



Obrázek 12: Splnění požadované recyklační kvóty (RQ) při ekologické likvidaci autovraků (Údaje jsou uváděny v % hmotnosti vozu) [20]

Na Obr. 13 vidíme příklad materiálového složení a využití odlitků a slitin při výrobě vozu škoda Octavia 1,9 TDI



Obrázek 13: Příklad materiálového složení vozu Škoda Octavia 1,9 TDI 74 kW, 5stupňová převodovka, hmotnost 1 363 kg [20]

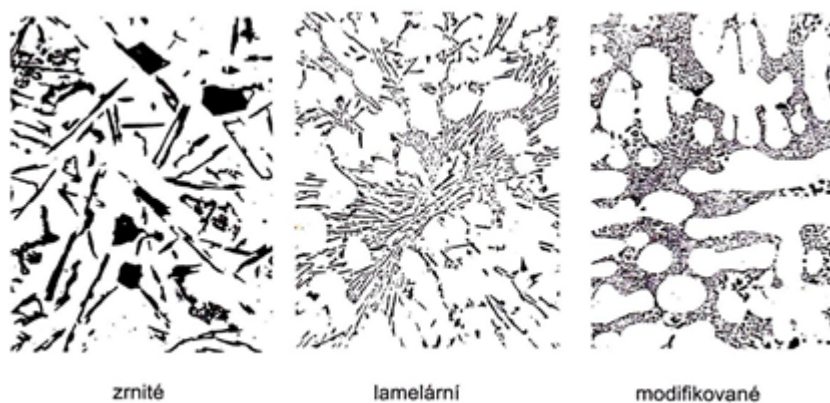
Hliník a jeho slitiny se dále používají například v leteckém průmyslu (největší procento použitých hliníkových materiálů z celkového objemu je při výrobě letadel), dále pak v kolejové dopravě (výrobu kompletní karosérie tramvají a vozů metra), v lodní dopravě (od jachet, přes rybářské lodě až k hlídkovým plavidlům), kosmonautice, strojírenství (druhý největším spotřebitelem odlitků z hliníkových slitin-armatury, ventilátory, adaptéry, potrubí, skříně, víka, ventily, kohouty, a další součásti manipulační techniky, stavebních strojů, domácích spotřebičů a dalších), stavebnictví (výroba průmyslových fasádních prvků, které se využívají při budování nákupních center, kancelářských budov firem a společností, bank, vlakových a autobusových nádraží, výstavních pavilonů, benzínových pump a mnoha dalších) [6].

## 2 VLASTNOSTI A VADY MIKROSTRUKTURY AL-SI SLITIN

### 2.1 Charakteristiky mikrostruktury

Mikrostrukturní charakteristiky, které nejvíce ovlivňují mechanické vlastnosti, jsou **velikost a tvar zrna**, **vzdálenost mezidendritických ramen**, **velikost a rozprostření částic sekundárních fází a inkluzí**.

Některé z těchto vlastností, jako například velikost zrna a mezidendritická vzdálenost, jsou řízeny primárně pomocí řízení rychlosti ochlazování. Na Obr. 14 můžeme vidět různé mikrostruktury, které se projevily u stejné slitiny vlivem různých rychlostí ochlazování spojených s různými lícími procesy [21].



Obrázek 14: Odlišné mikrostruktury slitiny Al-Si s obsahem 5 hm. % Si obdržené v závislosti na rychlosti ochlazování různých lících procesů: a – písková forma, b – permanentní forma, c – tlakové lité [21].

#### 2.1.1 Velikost a tvar zrna

Stejně jako u velikosti zrna a vzdálenosti dendritických ramen je čím jemnější disperze inkluzí a sekundárních fází, tím má odlitek lepší vlastnosti. Jemná disperze vyžaduje malé částice. Velké množství oxidů a intermetalických sloučenin zapříčiňuje křehkost odlitku.

Řízení velikosti a tvaru fází může být do určité míry provedeno řízením a dodržáním požadovaného složení, ovšem nejefektivnějším způsobem řízení velikosti zrna je minimalizace času, po který mohou zrna růst, což znamená velkou rychlost ochlazování. Je tedy evidentní, že co se týče kvality odlitku, má rychlost ochlazování vysoký vliv.

Ovlivnit velikost a distribuci primárních a intermetalických fází pomocí řízení chemického složení je poměrně složité. Velikost zrna a rozdělení intermetalických částic pomocí chemického složení se nicméně může vhodně ovlivňovat řízením obsahu nečistot, poměrů

prvků podle stechiometrických koeficientů intermetalických fází a dodržení podmínek solidifikace pro zajištění stejnorodosti. Další možností, jak ovlivnit mikrostrukturu při tavení a odlévání, je použití modifikátorů a prvků zjemňujících zrna [21].

### **2.1.2 Vzdálenost dendritických ramen**

U všech běžně používaných komerčních procesů dochází při solidifikaci k tvorbě dendritů. Velikost mezidendritických prostorů v dendritické struktuře odpovídá vzdálenosti mezi primárními dendritickými rameny a je řízena primárně rychlostí tuhnutí. Další činitel, který ovlivňuje tyto vzdálenosti, může být přítomnost inkluze oxidů či plynů další fáze. Během tuhnutí se mohou druhotné částice a inkluze oddělovat v oblastech mezidendritických ramen. Čím vyšší jsou mezidendritické vzdálenosti, tím drsnější je rozdělení fází, a tím více jsou zřejmé jejich negativní účinky na vlastnosti. Stejný směr můžeme pozorovat i u tažnosti, která klesá, pokud mezidendritická vzdálenost roste.

Ačkoli existuje více působení, které do určité míry uspořádávají mezidendritickou vzdálenost, jediným účinným způsobem, jak zajistit jemné rozmístění, je užití rychlého ochlazení. Pokud se tedy odlévají prémiové odlitky, či odlitky jiné, je kladen velký důraz na správné udržování rychlosti tuhnutí. Pokud bude rychlost tuhnutí optimální povede k požadovaným výsledkům. Rychlost tuhnutí má na výsledných vlastnostech největší vliv [21].

### **2.1.3 Zjemnění zrna**

Velikost zrna může být do jisté míry řízena doplňkem prvků pro zjemnění zrna, ale preferovanou metodou jsou nízké lící teploty a vysoké rychlosti ochlazování. Kvůli nejlepší kombinaci pevnosti a houževnatosti je u hliníkových slitin běžně požadována jemnozrnná rovnoosá struktura. Všechny hliníkové slitiny mohou být za pomoci vhodných legur připraveny s jemnozrnnou rovnoosou strukturou.

Nejčastěji jsou používány prvky pro zjemnění zrna předslitiny titanu a bóru v hliníku a předslitiny titanu v hliníku. Předslitiny na základě Al-Ti-B mají stejný obsah bóru a titanu v rozmezí 0,2-1 hm. %, čímž poměr titanu k boru odpovídá hodnotám 5 až 50. Třebaže tyto prvky mohou být považovány za tradiční zpevňující přísady (předslitiny), od běžných předslutin přidávaných při tavně se liší. Tyto prvky musí obsahovat určité řídicí množství aluminidů (a boridů) ve správné formě pro zajištění správného účinku, velikosti a distribuci pro umožnění nukleace zrn. Předslitiny s titanem obsahují většinou 3-10 hm. % titanu.

Tyto předslitiny existují v různých formách, např. tvářené tyče o požadované délce nebo jako soli (většinou v kompaktní formě), které reagují s roztaveným hliníkem a dochází ke vzniku  $\text{TiAl}_3$  a  $\text{TiB}_2$  [21].

## 2.2 Vady v odlitcích Al-Si slitin

Z ekonomického hlediska jsou vady u odlitků, stejně jako u každého jiného výrobku, nežádoucím projevem výrobního procesu. Za vadu (chybu) odlitku považujeme každou odlišnost rozměrů, hmotnosti, tvaru, makrostruktury, anebo odchylky vlastností získané laboratorními zkouškami od příslušných norem, nebo technických podmínek.

Problematika výroby odlitků je velmi rozsáhlým předmětem a se zdokonalováním a s růstem výrobních metod, se stále víc a víc rozrůstá literatura, která se touthle problematikou zabývá.

Vady litých hliníkových slitin jsou podobného typu jako v případě odlitků jiných kovových slitin. Ovšem každá slitina má různé vlastnosti ke slévání. Například výskyt staženin, trhlin, zabíhavost, výskyt prasklin nebo schopnost smrštění. Tyto vlastnosti stanovují rozdíly ve výskytu slévárenských vad. U slitiny hliníku je charakteristická velmi vysoká vázanost ke kyslíku, a to jak v tekutém, tak v tuhém stavu. Proto mají tyto slitiny sklon k tvorbě oxidů. U hliníkových slitin je velmi rozdílné chemické složení, kvůli kterému se výrazně liší i tvorba struktury. Hliníkové slitiny mají velmi specifickou strukturu a jsou s ní spojeny vady jak v mikrostruktuře, tak i v makrostruktuře. Mezi základní vady struktury patří dle normy ČSN 42 1240 *staženiny, řediny, makroskopické vměstky, trhliny povrchové, vnitřní, pórovitost*.

### 2.2.1 Staženiny a řediny

Staženiny a řediny jsou dutiny, které vznikají v důsledku zmenšování objemu, když slitina tuhne. Příčinou vzniku je nesprávné nálitkování, ošetření nálitků a nedodržení zásad usměrněného tuhnutí. Nedodržením zásad usměrněného lití vzniknou řediny. Vzniku ředin zabránujeme doplněním materiálu do těchto dutin z nálitku. Doplnění musí být dostatečné. Vhodné je i zvýšení tlaku [22].

### 2.2.2 Trhliny

Trhliny jsou porušením souvislosti materiálu odlitku, ke kterému dochází ke konci tuhnutí při teplotách blízkých teplotě solidu nebo těsně pod nimi, kdy je kov v semiplastickém stavu a má minimální mechanickou pevnost. Trhliny vznikají v důsledku bržděného smršťování,



když vnitřní pnutí vzniká v důsledku tuhé konstrukce odlitku, smrštění bržděného nepoddajnou formou, nebo pnutím, které vzniká nestejnoměrným tuhnutím v průřezu odlitku [13,14].

### 2.2.3 Pórovitost a mikrostaženiny

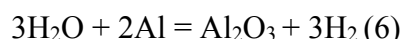
Pórovitost vzniká během tuhnutí, kde se rozpustnost vodíku rapidně snižuje. Pórovitost bývá zapříčiněna tvorbou staženin a bublin. Čisté plynové bubliny a čisté mikrostaženiny se vyskytují jen zřídka. V průběhu tuhnutí dochází k vyloučením plynů obsažených v tavenině a vznikají dutiny. Ty mají kulovitý tvar a nejsou přesně vázány ve stejné poloze. Staženiny vznikají v důsledku objemové změny tuhnucího kovu, která není kompenzována dosazením. Vznikají v oblastech hranic zrn [13,14].

U hliníkových slitin vedou ke vzniku pórovitosti zejména plyny jako vodík, dusík, vodní pára a kyslík. Nejčastějším plynem je vodík. Rozpustnost vodíku se v tekutém stavu Al slitiny výrazně zvyšuje s rostoucí teplotou, jako je znázorněno v Tab.4. U tuhého stavu toto neplatí, protože je nízká rozpustnost. Vodík se pak při krystalizaci vylučuje ve formě pórovitosti [23].

Tabulka 4: Rozpustnost vodíku v závislosti na závislosti teplotě a fázi [24].

Teplota [°C]	Fáze	Rozpustnost vodíku [ $cm^3/100gAl$ ]
560	tuhá	0,036
660	tekutá	0,69
900	tekutá – přehřátá	2,8

Při reakci s roztaveným hliníkem přispívá také vodní pára, kterou je možné popsat pomocí následující rovnice, k tvorbě vodíkové pórovitosti:



Vzniklé póry, které jsou následně v některých případech pokryty vrstvou  $Al_2O_3$ , při analýze lomové plochy může být tato vrstva v některých případech viditelná. Velký vliv na vznik pórů mohou mít i vstupní materiály, které jsou znečištěné. Například ingoty hliníku, na kterých se nachází vrstva oleje, nebo jiné nečistoty přispívající ke vzniku pórovitosti. Inertní plyny jsou důležité k zamezení obsahu vodíkových pórů. Tyto plyny slouží k navazování vodíkových bublin. Odplynění a následné naplynění taveniny slouží k odstranění vodíkových bublin a následné pórovitosti. Při tomto procesu dochází k vhánění inertního plynu do taveniny. Mezi nejčastější plyn patří argon. Dále se přidává rafinační sůl  $K_2CO_3 \cdot 1,5H_2O$  (uhličitan draselný) a  $K_2SiF_6$  (fluorokřemičitan draselný).

Zvolení vhodné lící teploty je dalším důležitým faktorem. Nachází se u odlitků ve tvaru dutin a různě velkých pórů. Nejlépe zjištělná pórovitost je na příčném řezu. Řez odlitku musí být veden kolmě na směr lití [4,6].

Tyto vady lze pozorovat zrakem nebo za použití světelného mikroskopu při malém zmenšení. Vzorek musí být při dokumentaci zkoumaných ploch dobře nasvícen. Z důvodu špatného odrazu světla mohou být některé vady špatně viditelné. Ke zjištění vad odlitků z Al-Si slitin v praxi jsou využívány rentgenové technologie. Odlitky jsou pak kontrolovány ještě před tepelným zpracováním a obráběním. U automobilových kol je RTG technologie využívána pro kontrolu vnitřní kvality odlitku a zaměřuje se zejména na pórovitost a další vady. Tato technologie se řadí do skupiny nedestruktivních zkoušek a probíhá na celém kole (viz. Obr.15). Pomocí RTG technologie je možné odhalit 95 % všech vad. [24,25].



Obrázek 15: 2 D rentgen ke zkoumání nedestruktivních vad [26]

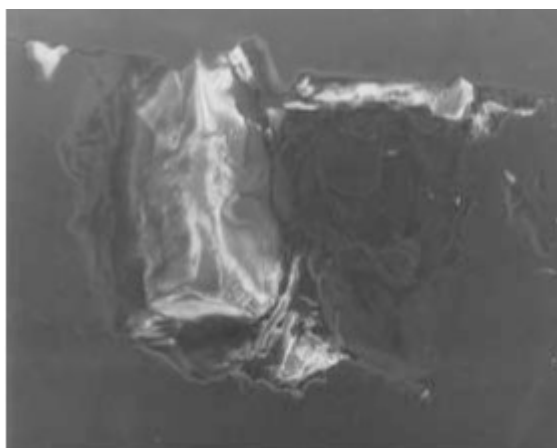
#### 2.2.4 Vměstky

Oxidické vměstky jsou cizorodé částice, které jsou nerozpustné v hliníku (od několika  $\mu\text{m}$  až po několik mm). Jedná se o oxidické částice nekovových prvků nebo kovů. Přítomnost těchto vměstků v materiálu souvisí hlavně s nedodržením technologických podmínek, jako např. špatný postup při legování, přehřátí taveniny aj., nebo nedostatečnou čistotou tavících a lících pecí, lících cest atd. Vměstky, podle příčiny, kterými vzniknou v tavenině, rozdělujeme

na exogenní (zbytky formovacích směsí, částice vyzdívky, zbytky stěr a solí atd.) dále pak na endogenní (oxidické blány, oxidy kovů, boridy, karbidy, spinely, nitridy). Vměstky snižují kvalitu materiálu, odolnost proti korozi či mechanické vlastnosti. Všechny vměstky jsou nežádoucí.

Vměstky z oxidických blan vznikají tehdy, když se části blány, kterou je taveniny pokryta, dostane do taveniny. Velikost vměstků z oxidických blán se může pohybovat od několika  $\mu\text{m}$  až po několik mm. V případě taveniny mohou vměstky oxidických blan vznikat již v peci (odpady, jejichž povrch obsahuje oxidické blány, nalití tekutého kovu do pece atd.) nebo mohou vznikat při lití materiálu mezi tavící pecí a licím žlabem (tavenina víří ve žlabu, žlab vaří – kovem prochází vodní pára, turbulence u vertikální trysky atd.).

Oxidické vločky se nacházejí především ve slitinách hliníku obsahující hořčík. Podstatou jejich vzniku je jiná rychlost růstu oxidických blan. Oxidická vrstva se skládá většinou z krystalického  $\text{MgO}$ , někdy také  $\text{Al}_2\text{MgO}_4$  (spinel) [6].



Obrázek 16: Oxidická blána z elektronového rastrovacího mikroskopu u slitiny AlMn1. Jedná se o morfologicky nepravidelnou velkou částici [6]

### **Nekovové vměstky**

Jsou o vměstky z keramických materiálů, pocházejících z vyzdivek pecí, ze zbytků licích žlabů, keramických filtrů, nátěrových hmot atd.

Vnesení do taveniny během tavení, zpracování nebo lití se dostanou do odlitku, což znamená zhoršení jejich kvality a možnosti následného zpracování [6].

## Boridové vměsky

Boridové vměsky se objevují v tavenině nejčastěji při zjemňování zrna přidavkem TiB (ve formě bloků) nebo AlTiB (ve formě drátů) do lázně v tavicí peci. Pokud se zjemňování provede v peci, dojde k hromadění boridů na dně pece. Opatřením, které vede k zamezení vzniku boridových vměstků je volba vhodného prostředku pro zjemňování zrna s co nejmenšími částicemi boridů. Nejdůležitějším opatřením k zamezení vzniku boridových vměstků je volba vhodného prostředku pro zjemňování zrna s co možná nejmenšími částicemi boridů (co největší poměr boridů do velikosti 3-5  $\mu\text{m}$ ) a s co nejrovnoměrnějším rozložením boridů v AlTiB z drátů nebo bloků. Vzhledem k tomu, že titan a bor má extrémně nízkou rozpustnost v hliníku, znamená to, že již před přísadou zjemňovacího drátu jsou v tavenině boridy, které se koncentrují v materiálu a např. formou odpadu se dostávají znovu do technologického cyklu.

Obávanými a nebezpečnými vměsky, jsou pro svou tvrdost boridy ( $\text{AlB}_2$ ,  $\text{AlB}_{12}$ , TiB,  $\text{TiB}_2$ ), neboť mohou vést k pórovitosti fólií, opotřebení nástrojů, usazování na lisovacích nástrojích a následně k rýhám na povrchu výlisků. Boridové vměsky, které jsou velké, mohou vést ke snížení únavových vlastností materiálu [6].

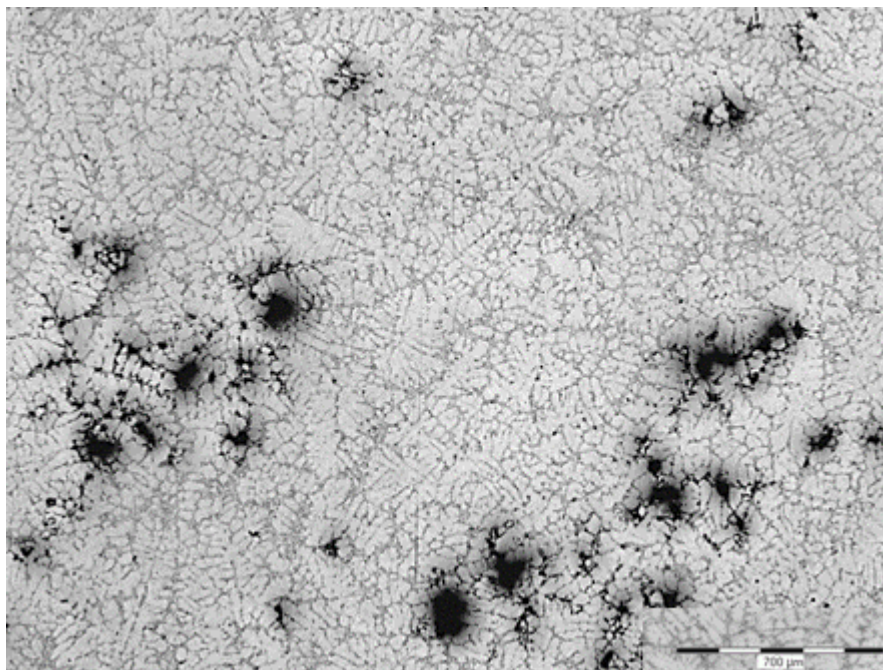
Titan je ve slitinách hliníku rozpustný v  $\alpha(\text{Al})$  do obsahu asi 0,2 % Ti. Pokud je obsah vyšší vznikají ve struktuře tvrdé krystaly  $\text{Al}_3\text{Ti}$  nebo TiC, které se vylučují ve shlucích a dělají problémy při obrábění, leštění a při anodické oxidaci. Ve slitinách hliníku je vlivem titanu nejvýznamnějším jeho očkovací účinek. Sloučenina  $\text{Al}_3\text{Ti}$  tvoří krystalizační zárodky pro nukleaci primární  $\alpha(\text{Al})$  fáze a způsobuje zjemnění zrna. Očkovací účinek titanu se zvyšuje za přítomnosti bóru, s nímž tvoří fázi  $\text{TiB}_2$ . Titan se v mnoha slitinách leguje v množství 0,1-0,2 %Ti, je rovněž součástí očkovacích solí a předslitin. Vlivy titanu na další vlastnosti souvisí nepřímo s jeho zjemňujícím účinkem. Díky zjemnění primárního zrna se mírně zlepšuje obrobitelnost, odolnost proti korozi i možnosti povrchové úpravy odlitků.

### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem bakalářské práce bylo hodnocení charakteristiky a mikrostruktury Al-Si slitin. Vzorky byly odebrány ze slitiny 3xx (Al-7Si-0<sub>3</sub>Mg) určené pro odlitky v automobilovém průmyslu. Vzorky odlitků byly zalisovány do pryskyřice za tepla a pod tlakem.

#### 3.1 Výskyt licích vad Al-Si slitin

Vyhodnocení pórovitosti bylo vykonáno za využití optické mikroskopie. Pomocí propojení digitální kamery a mikroskopu byl obraz přenesen do počítače. Struktura snímků vzorků byla následně zaostřena a vyfocena. Dále bylo nutno tyto fotografie upravit do odstínů šedočerné barvy. Tím došlo k vyloučení některých faktorů, které by mohly zkreslit výsledek – např. rýha přes hodnocený metalografický výbrus může být po kontrastním zbarvení hodnocena počítačovým programem jednoduše jako pórovitost. Obrazová analýza takto upravených fotografií byly zpracovány pomocí počítačového softwaru Image-Pro Plus od firmy Media Cybernetics. (Obr. 28) Na takto zhotovených fotografiích, bylo možné provést analýzu pórovitosti a hodnocení jejího plošného zastoupení. Pozorované plochy vzorků a jejich zkoumané části museli být dokonale vybroušeny a poté vyleštěny. Tyto vady lze pozorovat na následujících snímcích.



Obrázek 17: Al-Si mikrostruktura s licí vadou – pórovitost

Ve slitinách hliníku má významný vliv na vznik porozity vodík. Ten má dostatečnou rozpustnost v tekutém hliníku právě na to, aby odlitky tímto způsobem ovlivnil. Hlavním zdrojem vodíku bývá vlhkost v pecní atmosféře.

Když se roztavený kov dostane do styku s vlhkostí v atmosféře dochází k disociaci vody. Kyslík pak reaguje s hliníkem, vzniká oxid hlinitý a vodík. Tuto reakci popisuje rovnice, k tvorbě vodíkové pórovitosti, uvedená v kapitole pórovitost a mikrostaženiny.

Dalším zdrojem vodíku je vlhkost v nedokonale vysušených rafinačních solích, které jsou hygroskopické. Ty musejí být skladovány v suchu a před použitím se vysouší při teplotě kolem 200 °C. Zásadní vliv na přítomnost vodíku také nedokonale vysušené pecní vyzdívky, tavicí kelímky a používané kovové nářadí. Podstatným zdrojem vlhkosti může být také samotná vsázka. Vodík je zde vázán v pórech na povrchu materiálu a také v hydroxidech, které se vyskytují na zoxidovaném povrchu vsázkového materiálu. Ze spalných plynů v udržovacích a tavicích pecích vzniká vodní pára a uhlovodíky, to jsou další zdroje vodíku, stejně tak jako zamaštěná nebo jinak znečištěná vsázka apod. Příčinou vzniku bublin ve slitinách hliníku je snížení rozpustnosti vodíku během tuhnutí taveniny.

### **3.2 Mechanizmy vzniku pórovitosti**

Pórovitost ve slitinách hliníku může vznikat třemi cestami. První může být během tuhnutí vlivem změny rozpustnosti vodíku. Druhá pak objemovou změnou během. Nebo třetí cestou, což je nejčastější případ, je kombinací obou těchto procesů.

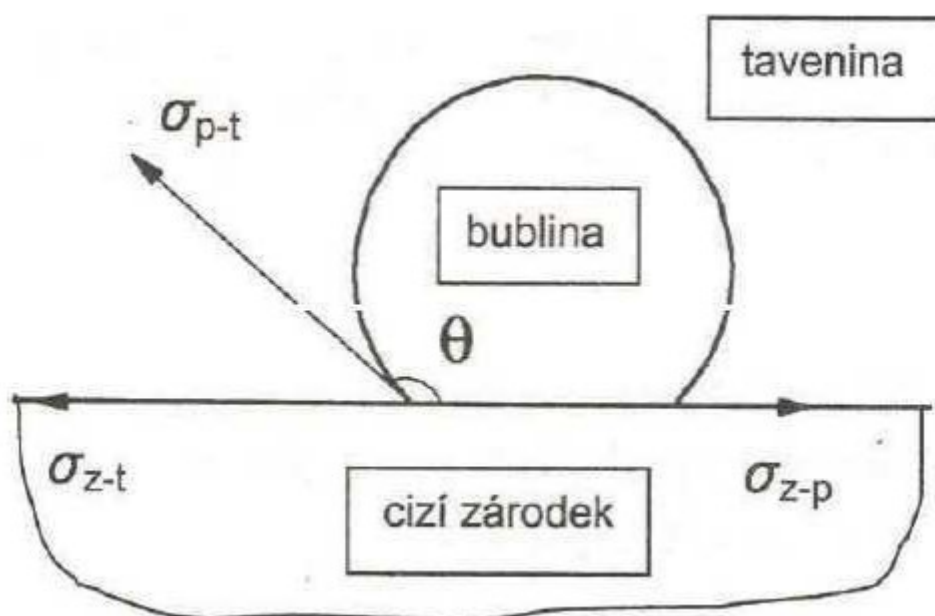
Podle výzkumů vzniku pórovitosti byla vymezena pravidla, která popisují vznik vodíkové pórovitosti [19].

Prvním pravidlem je, že bez ohledu na složení slitiny a podmínky tuhnutí, aby došlo ke vzniku pórovitosti, musí být překročena kritická hodnota obsahu vodíku, která je dána rovnovážnou koncentrací. Dalším pravidlem je, že každé rychlosti chladnutí odpovídá obsah vodíku, který nezpůsobí porozitu. Dále pak pro každou specifickou rychlost tuhnutí dochází při snížení obsahu vodíku ke zmenšení plochy a objemu pórovitosti.

A nakonec pro danou slitinu a obsah vodíku, dojde při zvýšení ochlazovací rychlosti ke snížení objemu pórovitosti.

Kritická hodnoty vodíkové koncentrace závisí na tlaku. Při zvýšení tlaku při tuhnutí dochází ke zvýšení mezních hodnot, naopak při odlévání pod vakuem se mezní hodnoty snižují.

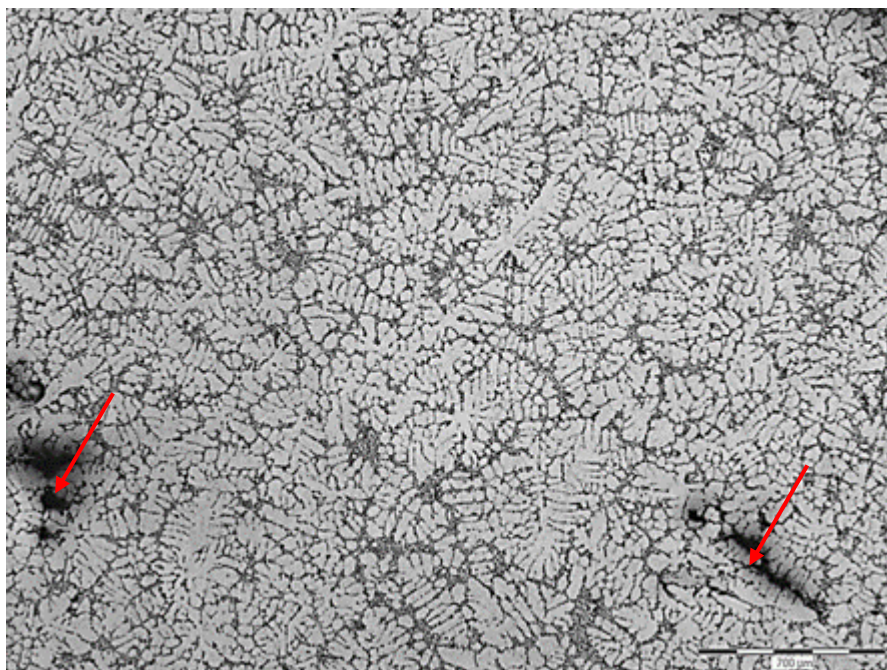
Mechanismus tvorby pórovitosti je také silně provázán se staženinami v odlitku. Při nukleaci plynových bublin se významně uplatňují i lokální tlakové poměry. Při krystalizaci tuhé fáze dojde k uzavření mikroobjemů taveniny. Následně v nich nedochází k dosazování tekutého kovu. V těchto místech vzniká lokální podtlak, podle Sievertsova zákona (Obr.4.) a vznikají tak příznivé podmínky pro vznik plynových dutin. Vhodným místem pro vznik dutin jsou pak mikrostaženiny. Pórovitost bývá kombinací vzniku bublin a tvorby mikrostaženin. Čisté mikrostaženiny nebo čisté plynové bubliny se jako vady v odlitcích vyskytují poměrně zřídka. Typy dutin lze rozeznat podle tvaru. Plynové dutiny mají kulatý tvar, naopak staženiny mají pouze členitý tvar a kopírují dendritickou strukturu kovu. Pórovitost je kombinací nejen mechanismu vzniku, ale i tvaru obou dutin, tzn. že dutiny jsou zakulacené s okraji kopírujícími dendritickou strukturu [27].



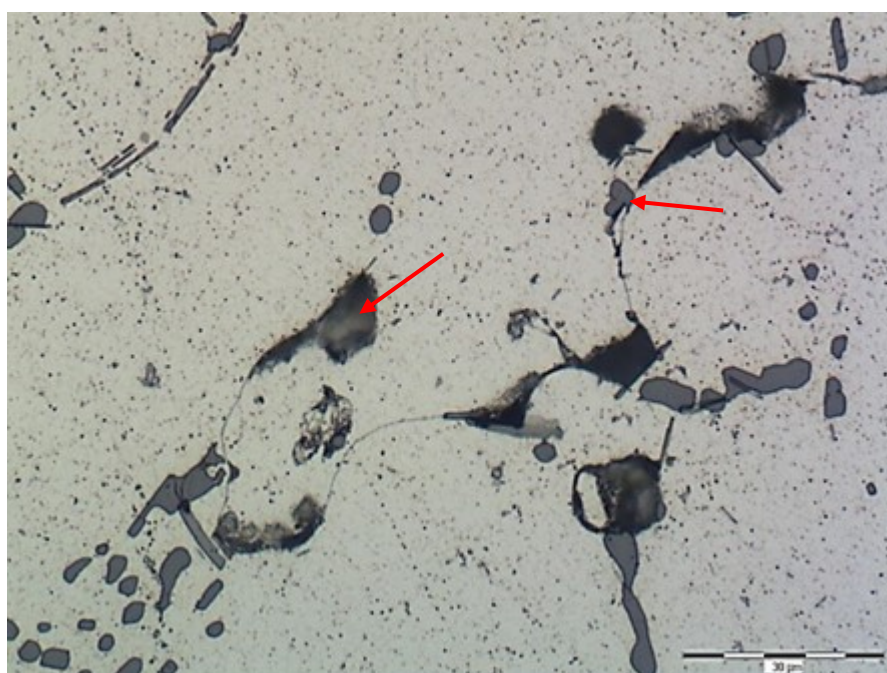
Obrázek 18: Tvorba bublin na cizím zárodku [28]

kde:  $\sigma_{z-t}$  - povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou  $\sigma_{z-p}$  - povrchové napětí mezi zárodkem a plynem  $\sigma_{p-t}$  - povrchové napětí mezi plynem a taveninou.

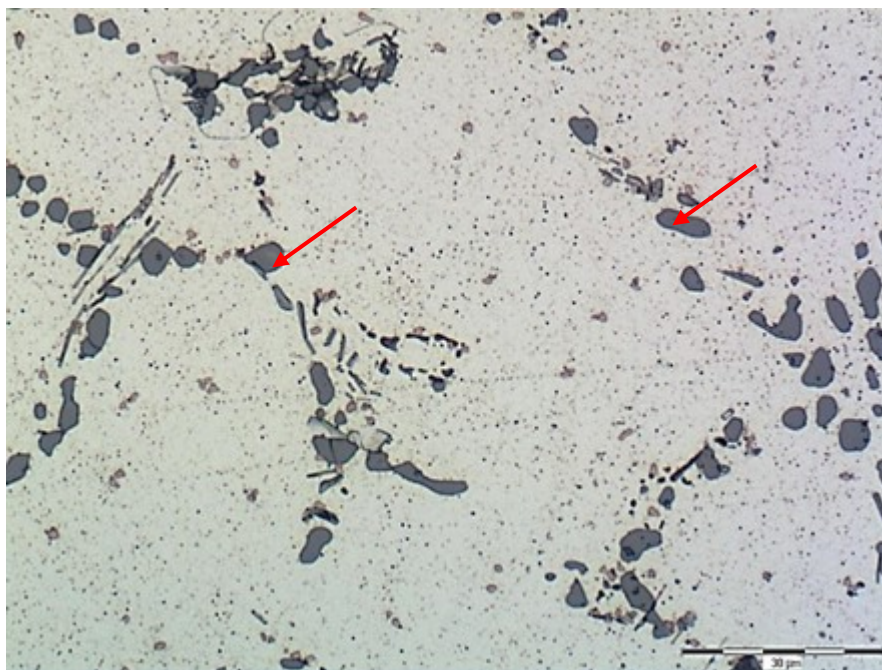




Obrázek 19: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou -červenými šipkami je označena staženina



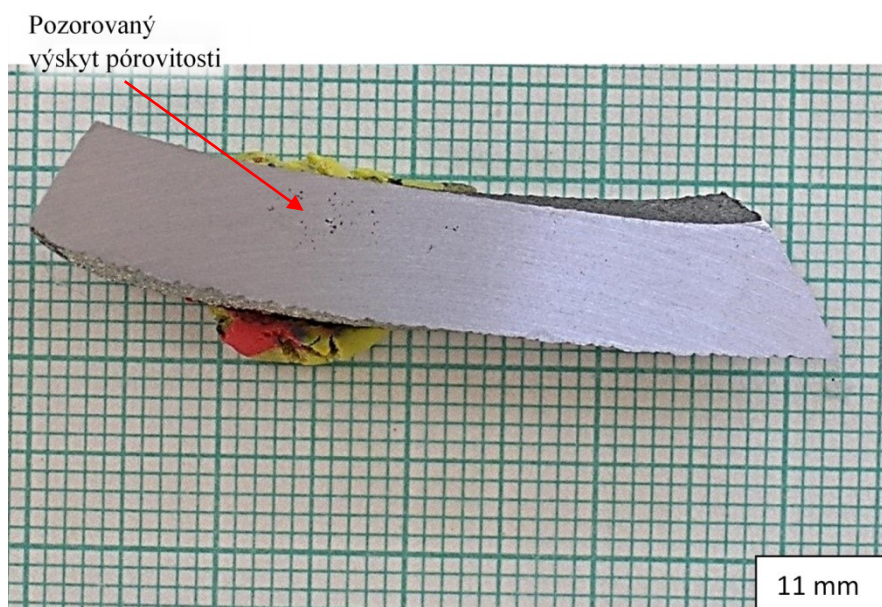
Obrázek 20: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou – červenými šipkami jsou označeny plynové bubliny



Obrázek 21: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou -shluky Si částic u staženiny

### 3.3 Vzorky z odlitku

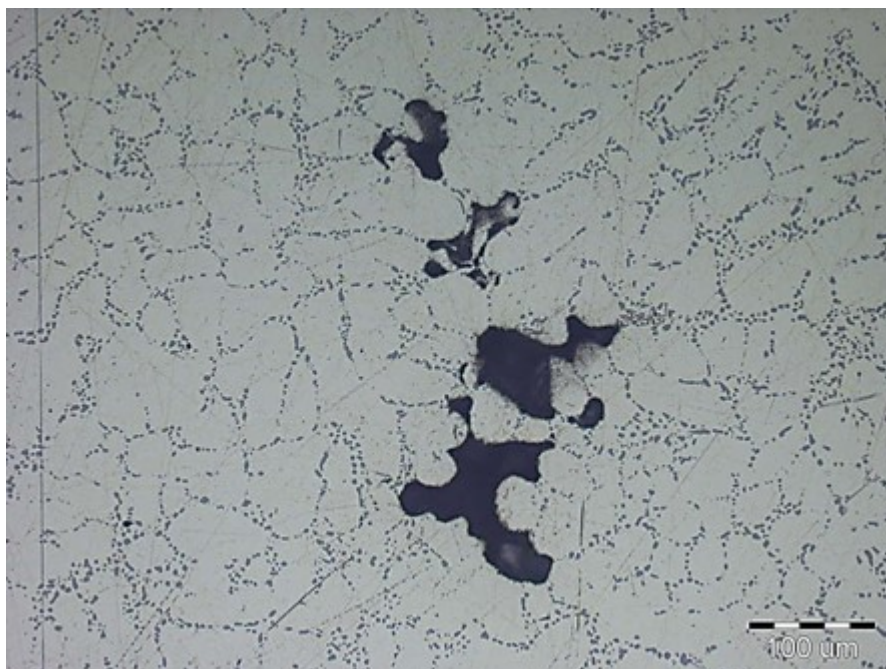
U vzorků z odlitku součásti byla v konečné fázi po tepelném zpracování a povrchové úpravě zjištěna pórovitost, která je znázorněna na Obr. 22.



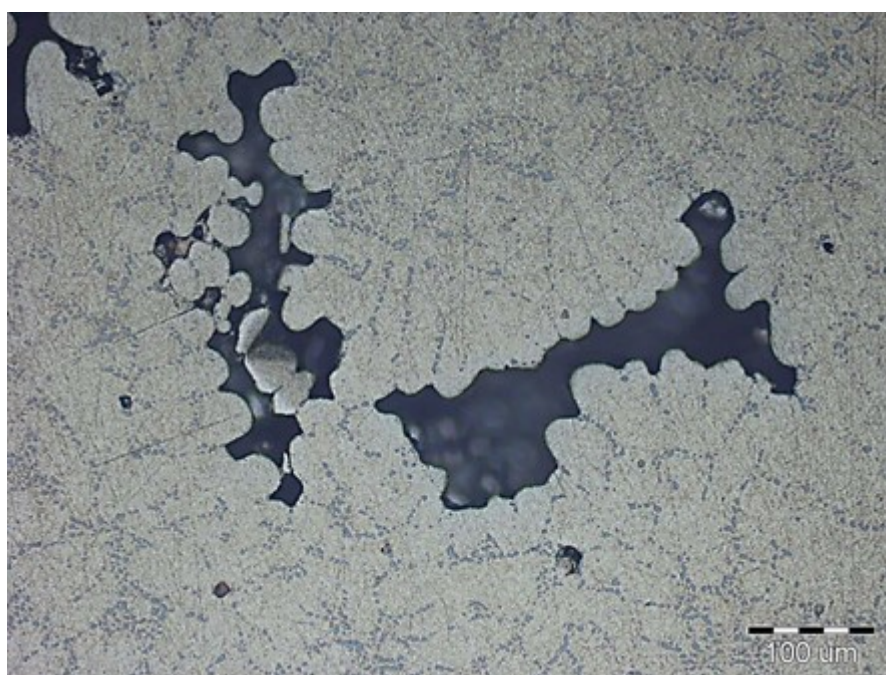
Obrázek 22: Vzorek části odlitku z hotového výrobku z Al-Si slitiny licími vadami - šipkou je znázorněn výskyt pórovitosti



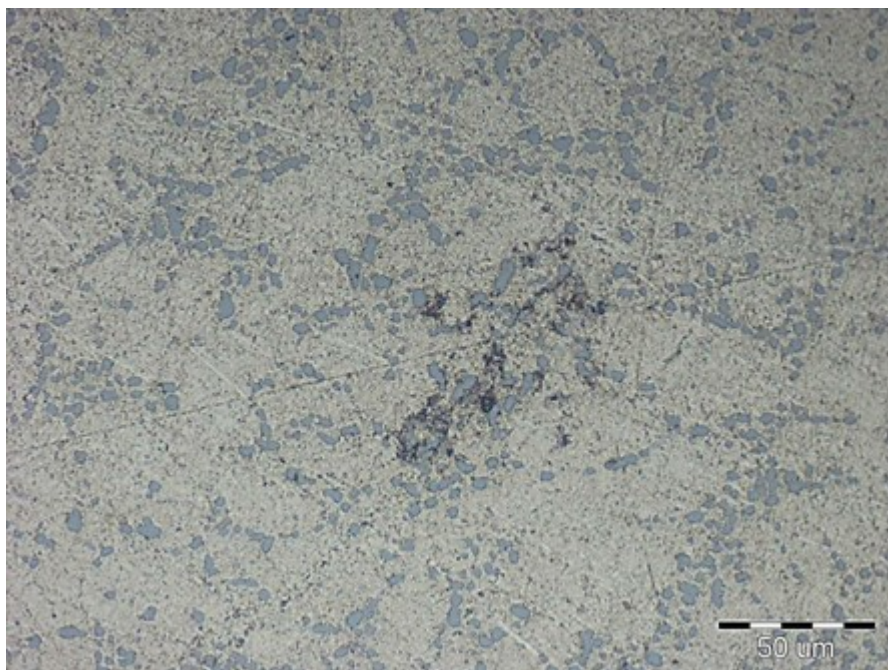
Na snímcích z optické mikroskopie můžeme pozorovat strukturu s pórovitostí (Obr. 23-27)



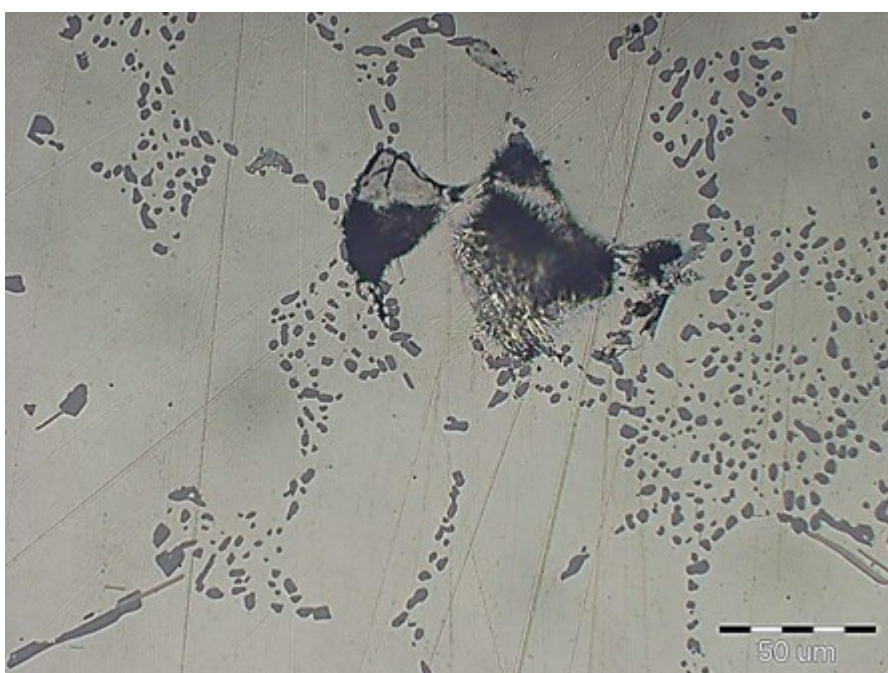
Obrázek 23: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou – staženina



Obrázek 24: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou – staženina

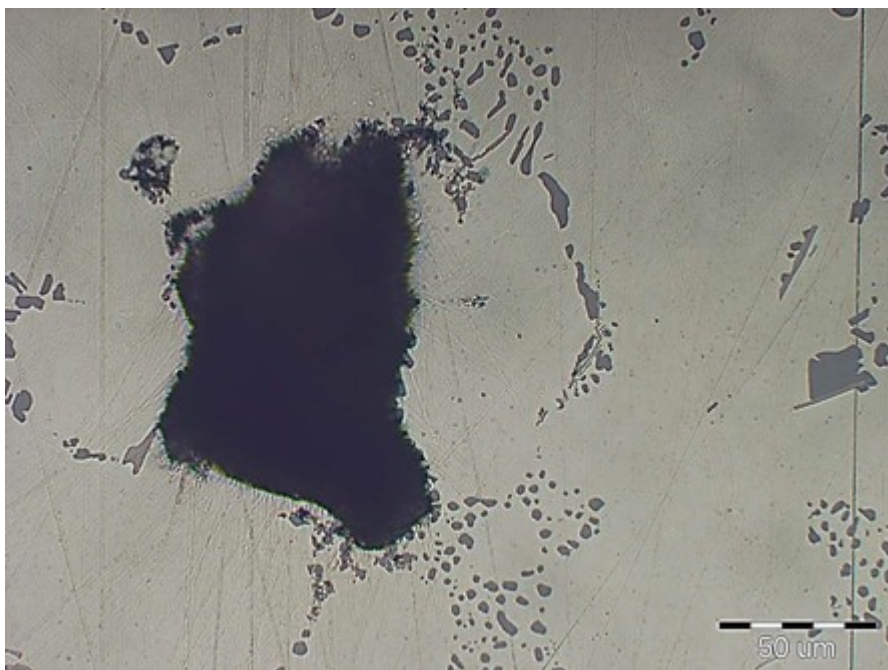


Obrázek 25: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou – pórovitost



Obrázek 26: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou – pórovitost

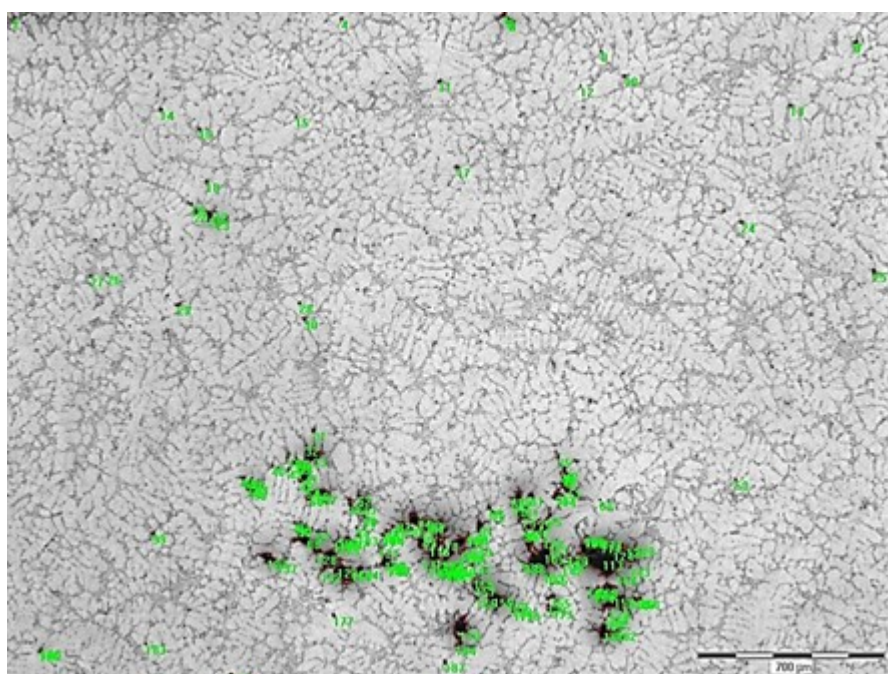




Obrázek 27: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou – kombinace uzavřeného plynu a staženiny

Procentuální zastoupení vad:

U vzorků, které byly odebrány z hotových výrobků, byla stanovena 1,7 % pórovitost. Metoda výpočtu procentuálního zastoupení je znázorněna na Obr. 28.



Obrázek 28: Snímek z měření zastoupení pórovitosti

## ZÁVĚR

Poslední část této práce se zabývá diskuzí a vyhodnocením výsledků. Pozorování mikrostruktury, zaměřené na studium vad a zejména pórovitosti, umožnilo vyhodnotit jejich velikost, tvar a charakter. Procentuální zastoupení licích vad v podobě pórů a ředin bylo stanoveno prostřednictvím optického mikroskopu obrazovou analýzou pomocí počítačového softwaru Image-Pro Plus od firmy Media Cybernetics.

Pomocí mikroskopické technologie je možno odhalit široké spektrum povrchových vad. Mikroskopické vady jsou velice malé, okem téměř neviditelné a vznikají u slitin s širokým intervalem tuhnutí. Bohužel není možné prostřednictvím mikroskopické technologie zjistit skryté vady uvnitř odlitků. Pro zkoumání vnitřních vad se používá RTG technologie, která může odhalit 95 % všech vad.

Poměrně časté zastoupení vad v materiálu ukazují výsledky, kterých bylo dosaženo. Tyto vady byly především pórovitého charakteru, který souvisí s obsahem vodíku v tavenině. Z tohoto důvodu můžeme doporučit odplynění taveniny. Další vliv na poměr vad ve slitině mají modifikující složky. Je tedy důležité, aby obsahy stroncia a očkovací předslitiny Ti5B1 byly v optimálním poměru. Při zvýšeném obsahu stroncia nad 0,5 hm. % značně roste pórovitost materiálu.

Pokud se podíváme na procentuální měření pórovitosti, která vyšla 1,7 %, je zřejmé, že jsou jen nepatrně vyšší, což nemusí mít v konečném důsledku patrný vliv na změnu mechanických vlastností a následně pro další aplikace. Nelze ji však v technických aplikacích zanedbávat, protože se může razantně projevit ve výsledné jakosti odlitku.

## LITERATURA

- [1] KŘÍŽ, R.; VÁVRA, P. Strojírenská příručka-3.svazek. Praha: Scientia, 1993. 254 s. ISBN 80-85827-23-9.]
- [2] ZMYDLENÝ, Tomáš. 2003. Hliník a slitiny hliníku: Úvod do svařování[prezentace]. [cit. 2015-05-15].
- [3] RYŠ, Přemysl; KLESNIL, Mirko; USTOHAL, V. Nauka o materiálu. Brno: VAAZ, 1965. 725 s.
- [4] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3(2.OPR.A ROZŠ. VYD.).
- [5] Al – Mg binary phase diagram. [online]. [cit.2015]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Al-Mg-binary-phase-diagram\\_fig6\\_274967904](https://www.researchgate.net/figure/Al-Mg-binary-phase-diagram_fig6_274967904)
- [6] MICHNA, Š; et.Al. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, 2005.701 s ISBN 80-89041.88-4]
- [7] SHENG, Howard. *AlCu energy* [online]. Mar 12, 2009, , 1 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/eampotentials/Home/AlCu>
- [8] The Aluminum Association. Rolling Aluminum: From the Mine Trought the Mill. 3rd ed. Arlington, 2007. 135 s.
- [9] HRČKOVÁ, M. Optimalizace tepelného zpracování slitiny hliníku AlSi7Mg0,6. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Juliš, Ph.D
- [10] Advances in Materials Science and Engineering. *Calculation of Liquidus Temperature for Aluminum and Magnesium Alloys Applying Method of Equivalency* [online]. 2013 · October 2013. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/ped/kat/fyzika/autem/pages/vyroba.html>
- [11] PODRÁBSKÝ, T, NĚMEC, K, JULIŠ, M. Neželezné kovy a jejich slitiny: doplnění a rozšíření přednášky “Strojírenské materiály“ z předmětu, BUM. [.s.l.]: [.s. n.], 2008. 40 s ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 10th ed. Materials Park, OH: ASM International, 1990. ISBN 9780871703781.
- [12] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P. a kolektiv. Nauka o materiálu I. Část3. 2. Vyd. Academica, Praha, 1973. 596 s.
- [13] BERNÁŠEK, V., HOREJŠ, J.: Technologie slévání, Západočeská univerzita v Plzni, 2006, 176 s. ISBN 80-7043-491-0 [10] ROUČKA, J., KOPLÍK, R.: Výzkum a vývoj procesu řízeného lití a plnění forem a usměrněného tuhnutí odlitků ze slitin Al odlévaných do kokil.: Analýza vad odlitků ze slitin Al odlévaných do kokil. Mood International, Brno, 2006.
- [14] ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [15] Jinguo QiaoT, Xiangfa Liu, Xiangjun Liu, Xiufang Bian Relationship between microstructures and contents of Ca/P in near-eutectic Al–Si piston alloys
- [16] Chvojka, J., Brzobohatý, M. Zpracování a použití hliníku a jeho slitin. Praha : Státní nakladatelství technické literatury a Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry 1961

- [17] Čerpáno z Bakalářské práce, Optimalizace procesu zpracování profilů ze slitin hliníku, Petr Šedivý, 2001
- [18] Advances in Materials Science and Engineering. *Metalurgie slitin hliníku* [online]. 1997 - 2014. Dostupné z: <http://www.strojnicketabulkyonline.cz/odlevani/metalurgie-slitin-hliniku/>
- [19] DAĐOUREK, Doc.Ing.Karel. *Precipitační vytvrzování* [online]. 2007. Dostupné z: <http://docplayer.cz/19964779-Precipitacni-vytvrzovani.html>
- [20] Kolektiv autorů. *Význam dopravy* [online]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/ped/kat/fyzika/autem/pages/vyroba.html>
- [21] ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 10th ed. Materials Park, OH: ASM International, 1990. ISBN 9780871703781.
- [22] KOVVI, K., G., PLJACKIJ V.: Vady odlitků ze slitin neželezných kovů: určeno slévačům, mistrům, technologům a pracovníkům, OTK. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956, 129 s.,
- [23] Zjišťování obsahu plynu v tavenině [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: [http://www.rgu.cz/download/holec2009/12\\_prednaska.pdf](http://www.rgu.cz/download/holec2009/12_prednaska.pdf)
- [24] Forma pro nízkotlaké odlévání Al-Si disků kol. In: Svět Motorů [online]. 2014 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://svetmotoru.auto.cz/clanek/servis/4662/reportaz-hlinik-se-odstehoval-doneuenrade.html>
- [25] WANG, Ruyao a Weihua LU. Al-Si Alloys – An Undercooled Alloy Self-Modified Structure and Mechanical Properties [online]. [cit. 2017-04-15]. DOI: 10.5772/52962. ISBN 10.5772/52962. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/electrolysis/direct-electrolytic-al-si-alloys-deasa-an-under-cooledalloy-self-modified-structure-and-mechanical-p>
- [26] Techmagazín. *2D i 3D rentgenové přístroje pomáhají pečovat o „zdraví“ automobilů* [online]. 18. 10. 2011. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/248>
- [27] KNUUTINEN, A., et al. Porosity formation in aluminium alloy A356 modified with Ba, Ca, Y and Yb. *Journal of Light Metals*, 2001, 1.4: 241-249.





Obrázek 23: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou – staženina.....	38
Obrázek 24: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou – staženina.....	38
Obrázek 25: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou – pórovitost .....	39
Obrázek 26: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou – pórovitost .....	39
Obrázek 27: Vzorek Al-Si slitiny s licí vadou – kombinace uzavřeného plynu a staženiny....	40
Obrázek 28: Snímek z měření zastoupení pórovitosti .....	40

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Označování slitin hliníku na tváření podle EN 573-1 [6] .....	15
Tabulka 2: Řady slitin hliníku a značení [11].....	17
Tabulka 3: Tepelné zpracování versus dosažené mechanické hodnoty [17].....	22
Tabulka 4: Rozpustnost vodíku v závislosti na závislosti teplotě a fázi [24].....	29